Curso sobre

CONTROL Y SEGURIDADES de CALDERAS



Sección Española de ISA

Profesorado:

Alberto de la Sen Sanz (FI Controles)

Salvador Galván Marcos (FI Controles)

José Bielza Lino (FI Controles)



Días 21, 22 y 23 de Noviembre de 2000
Hotel Meliá Av. de América
Madrid

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS

1 INTRODUCCION

1.1 Generalidades

El control de una caldera es un tema extenso que incluye tanto los procedimientos de arranque y parada como los enclavamientos de seguridad y la operación en continuo de la caldera. Tradicionalmente al desarrollar el control de una caldera, las acciones de modulación de la misma se desarrollaban con equipos analógicos (continuos). Las secuencias de arranque y parada, así como los enclavamientos, son acciones digitales (todo/nada) que implicaban equipos digitales. Actualmente, debido a los avances en los sistemas basados en microprocesador es posible integrar estos dos sistemas en uno solo, aunque se siguen manteniendo algunos condicionantes en lo que se refiere a los equipos dedicados a la seguridad de la caldera.

Para poder desarrollar una aplicación de control adecuadamente es necesario entender correctamente los objetivos del sistema de control. En el caso de las calderas de vapor existen tres objetivos básicos:

a) Hacer que la caldera proporcione un suministro continuo de vapor en las condiciones de presión y temperatura deseadas.

b) Operar continuamente la caldera al menor coste de combustibles manteniendo un alto nivel de seguridad.

c) Arrancar y parar de forma segura, vigilar y detectar condiciones inseguras y tomar las acciones necesarias para una operación segura en todo momento.

Los dos primeros objetivos serán realizados por lo que tradicionalmente se conoce como sistema de control analógico, mientras que el tercero será labor del sistema de seguridades y manejo de quemadores.

Un diagrama básico de una caldera podría representarse como se muestra en la Figura 1-1.

En esta figura se pueden diferenciar dos sistemas distintos. El primero sería el sistema agua-vapor. En él, el agua que se introduce en la caldera es convertida en vapor, que sale de la caldera al recibir el calor necesario mediante la transferencia de calor a través del metal de los tubos. El segundo sistema es de combustible-aire-gases que es el que proporcionará el calor que se transmite al agua.

En este sistema, el aire y el combustible se mezclan y queman en el hogar. El hogar suele estar formado por paredes de tubos de agua que reciben el calor radiante de la llama y es por tanto donde se produce la máxima transferencia de calor. Los gases de combustión, como resultante de esta pérdida de calor, se enfrían y abandonan el hogar pasando a la zona de recuperación de calor formada por tubos de vapor en donde la llama ya no se ve y el calor se transmite por convección. Como la transmisión de calor depende, entre otras cosas, de que

exista una diferencia de temperatura, la temperatura de salida de los gases será siempre algo superior a la temperatura menor del circuito agua-vapor.

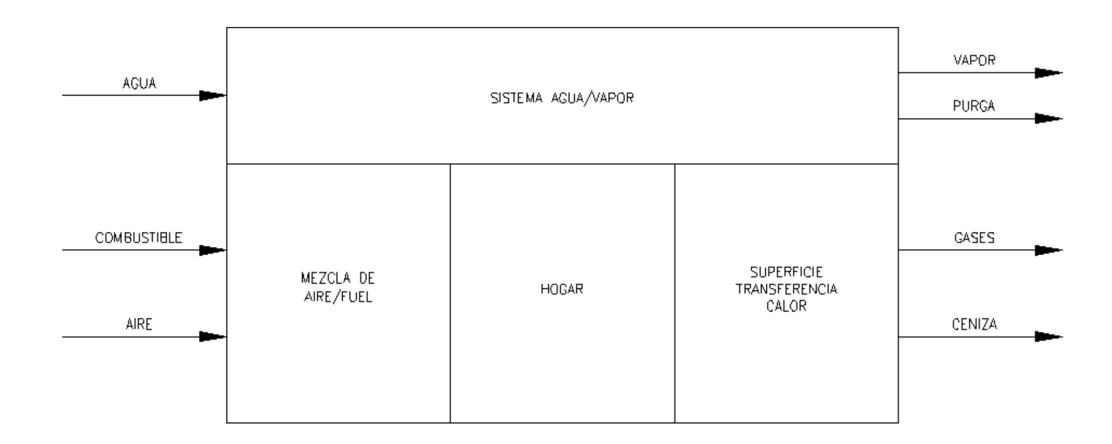


Figura 1-1. Diagrama básico de una caldera

Esta pérdida de calor disminuye el rendimiento del ciclo. Al objeto de elevar dicho rendimiento, los gases de combustión suelen pasarse por algún tipo de intercambiador de calor. Un primer ejemplo sería la instalación de un economizador (Figura 1-2), que consiste en un conjunto de tubos de agua expuestos a los gases tras la zona de recuperación de calor, con el propósito de calentar el agua de alimentación y aprovechar al máximo el calor de los gases de la combustión antes de abandonar la caldera.

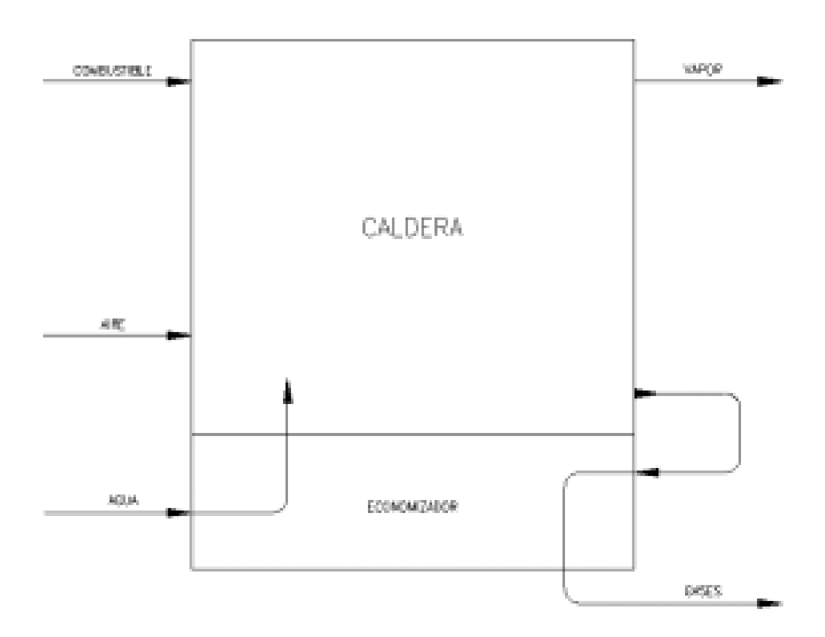


Figura 1-2. Caldera con economizador

Una segunda posibilidad sería aprovecharlos para elevar la temperatura del aire de entrada en lo que se conoce como precalentador de aire (Figura 1-3). En este caso se debe considerar que dichos gases pueden tener limitada su mínima temperatura si en su composición está presente el azufre. En aquellas instalaciones en las que es posible la instalación de ambos equipos lo normal sería pasar primero los gases por el economizador y después por el precalentador.

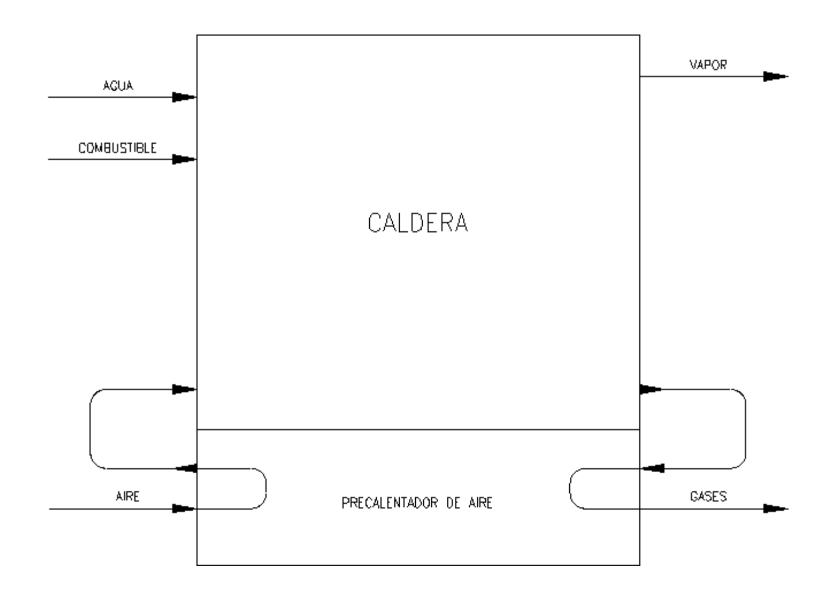


Figura 1-3. Caldera con precalentador de aire

1.2 Tipos de calderas

Aunque se pueden hacer muchas clasificaciones de calderas de acuerdo con diferentes criterios, se puede decir que hay dos tipos generales de calderas: las pirotubulares (tubos de humo) y las acuotubulares (tubos de agua) y dentro de éstas últimas se diferenciará entre calderas con calderín agua-vapor y calderas de paso único. Adicionalmente, las calderas se pueden clasificar en alta y baja presión, de vapor saturado o sobrecalentado.

El vapor saturado es aquél al que no se le ha calentado por encima de la temperatura de saturación. Se le denominará seco si ha sido totalmente evaporado, o húmedo con un % de humedad si no lo ha sido. El vapor sobrecalentado será aquél que, por el contrario, sí ha sido calentado después de su completa evaporación, modificando su temperatura para la misma presión. Al estar sobrecalentado puede entregar o perder parte de su energía sin condensar, con los beneficios que esto conlleva para su transporte o uso en turbinas.

Se entenderá por calderas de alta presión aquellas que operan a una presión superior a 1 bar. Una ventaja de usar calderas de alta presión es la reducción del tamaño de la caldera y de las tuberías de vapor para la misma capacidad de transporte de calor, debido al aumento de la densidad del vapor con la presión. Esto puede ser particularmente importante si los consumidores del vapor están a

alguna distancia de la caldera. Además la energía disponible en el vapor aumenta con la presión, algo esencial cuando el vapor se usa en una turbina.

Otra clasificación habitual de las calderas sería por el tipo de tiro. El aire necesario para la combustión se aporta normalmente a las calderas mediante ventiladores. Según estos ventiladores actúen sobre el suministro de aire, diremos que las calderas son de tiro forzado, inducido o equilibrado. Las primeras son aquellas en las que el ventilador, situado en la entrada, introduce el aire en la caldera, y por tanto son de hogar presurizado. Las segundas son las que teniendo el ventilador en la salida aspiran los gases de la combustión y los envían a la chimenea, siendo por tanto de hogar en depresión. Cuando coexisten ambos ventiladores la caldera se denomina de tiro equilibrado, haciéndose que el hogar trabaje un poco en depresión para evitar escapes de gases.

Volviendo a la clasificación general, las calderas pirotubulares son aquellas en las que los gases de la combustión circulan a través de tubos que están rodeados por agua. Muchas de las calderas pequeñas y medianas de la industria son de este tipo. Los gases de la combustión se enfrían a medida que circulan por los tubos, transfiriendo su calor al agua. La transferencia de calor es función de la conductividad del tubo, de la diferencia de temperatura entre el agua y los gases, de la superficie de transferencia, del tiempo de contacto, etc.. Un ejemplo típico de este tipo de calderas sería la Figura 1-4 en la que se aprecia un pequeño hogar sobre el recipiente con el agua, que a su vez es traspasado longitudinalmente por los tubos de los gases de la combustión. Las calderas pirotubulares pueden diseñarse con diferentes pasos de los tubos de humos por el recipiente con agua. El hogar se considera el primer paso y cada conjunto de tubos en el mismo sentido un paso adicional (Figura 1-5). Las calderas pirotubulares suelen trabajar hasta unos 20 bares para unas producciones máximas de unas 20 Tm/hr.

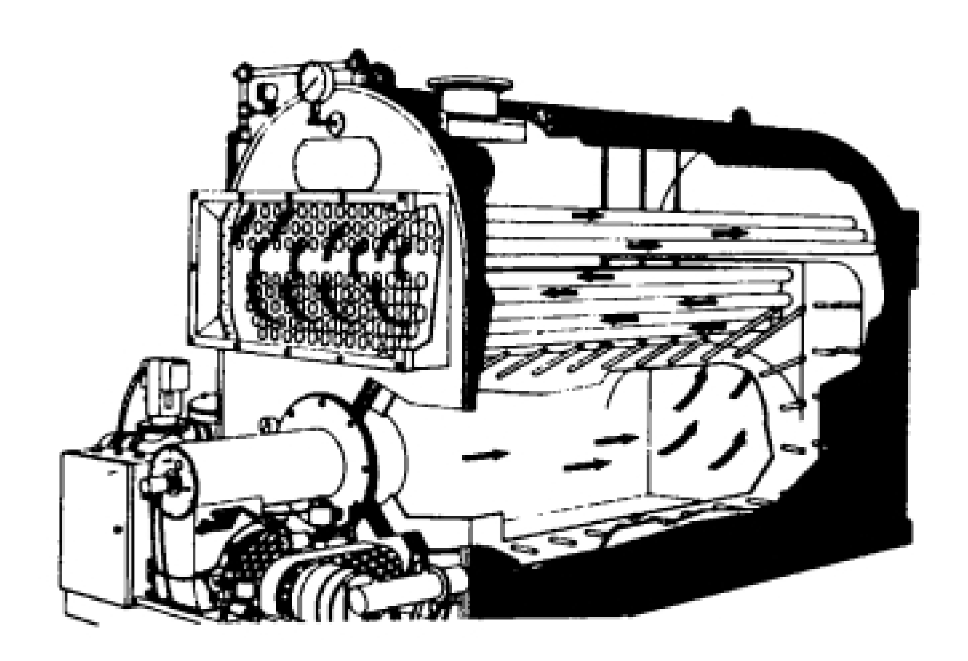


Figura 1-4. Caldera pirotubular

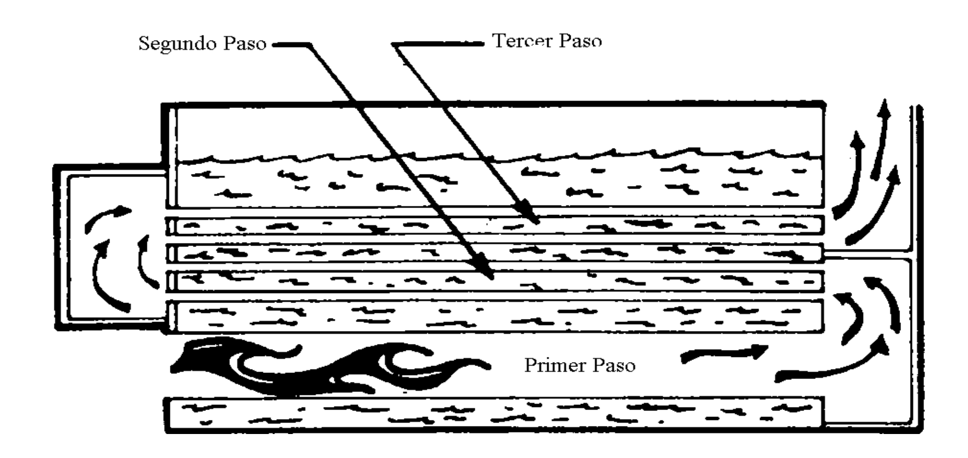


Figura 1-5. Pasos de caldera

Las calderas acuotubulares son aquellas en las que el agua circula por el interior de los tubos. Estos tubos están, generalmente conectados a dos calderines (Figura 1-6). El calderín superior de vapor, en el cual se produce la separación del vapor existente en el agua en circulación, y el inferior de agua, también conocido como calderín de lodos al depositarse éstos en él.

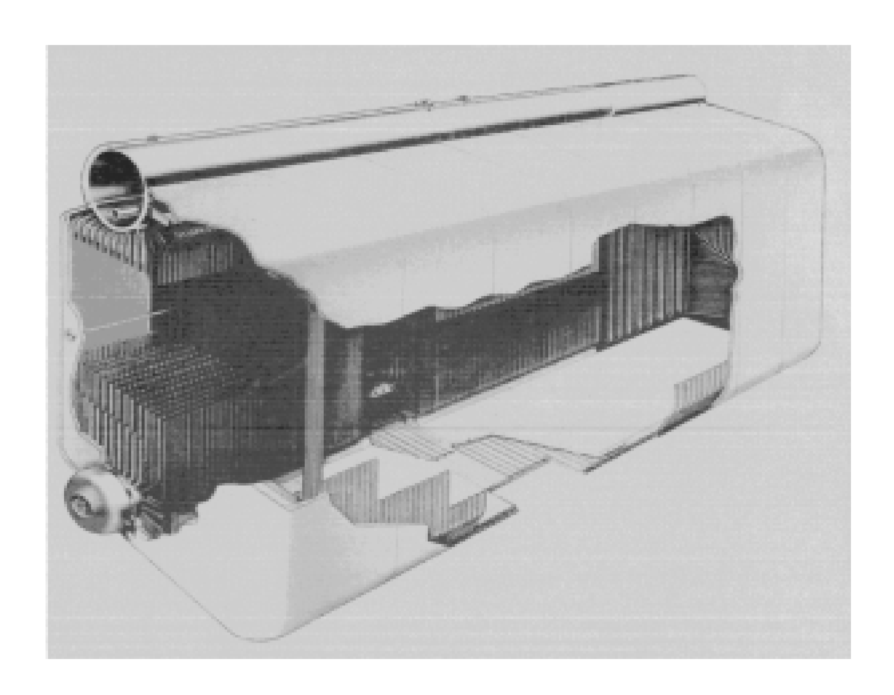


Figura 1-6. Caldera paquete acuotubular

En algunos casos este calderín inferior es sustituido por colectores, como es el caso de la caldera de recuperación de la Figura 1-7

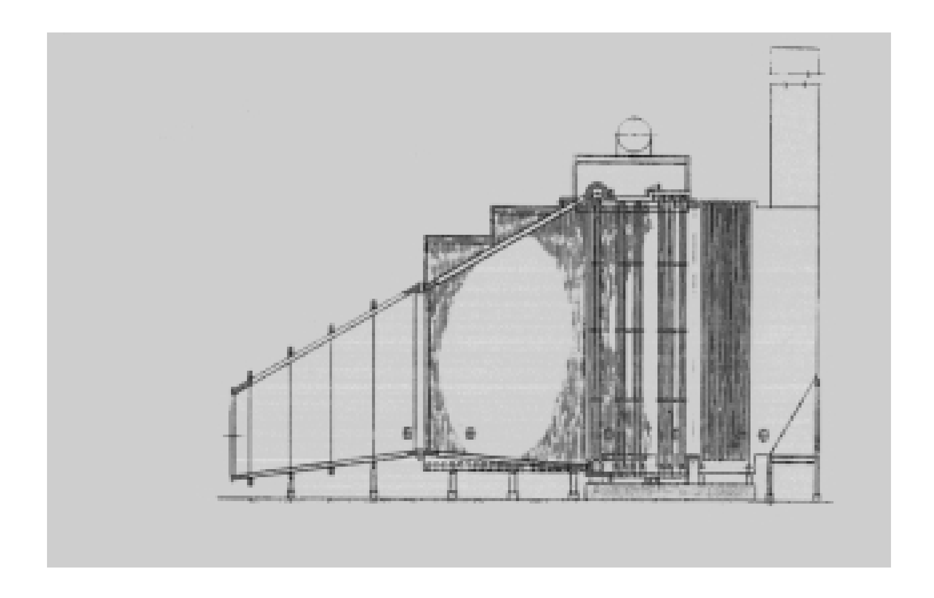


Figura 1-7. Caldera acuotubular de recuperación

Los tubos que unen ambos calderines se distribuyen de forma que una parte de ellos queda en el lado caliente de la caldera - zona de la caldera que está en contacto con los gases de la combustión - y otra en el lado frío (Figura 1-8). El agua de los tubos del lado caliente es parcialmente evaporada de forma que dicho vapor asciende hacia el calderín superior debido a la menor densidad de éste con respecto al agua. El agua de la parte fría circula del calderín superior al inferior debido a la mayor densidad del agua en esta zona, de forma que se produce una circulación natural de la masa de agua. Este tipo calderas suelen operar hasta presiones de 100 bares en el caso de las calderas industriales y de 200 en el caso de calderas para centrales térmicas, con unas producciones de 500 Tm/hr y 4000 Tm/hr respectivamente.

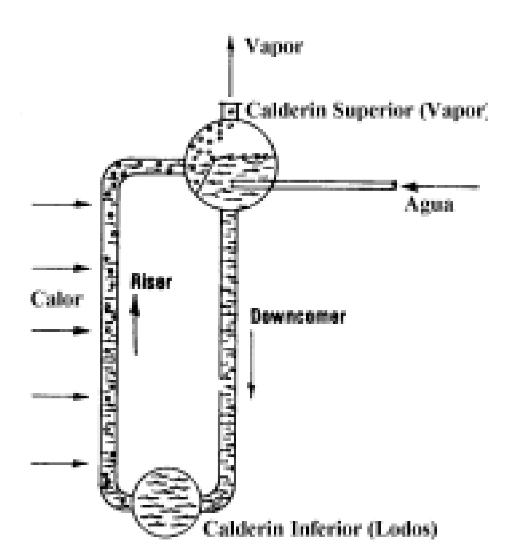


Figura 1-8. Circulación en una caldera acuotubular

Para presiones superiores a las indicadas, a partir de las cuales la circulación desciende rápidamente debido a que las densidades del agua y el vapor son similares, se utilizan calderas acuotubulares de paso único. En éstas calderas, la circulación es forzada por un sistema de bombeo que introduce el agua por un extremo y, tras ser calentada, sale en forma de vapor por el otro. Son capaces de trabajar hasta 350 bares de presión. Estas calderas son propias de centrales térmicas por lo que no nos detendremos en más particularidades sobre ellas.

1.3 Calderas industriales

Hemos visto en el esquema básico de una caldera que existen dos sistemas principales, el de agua-vapor y el de combustible-aire-gases. Este segundo sistema, por motivos de claridad en la exposición, lo dividiremos a su vez en el sistema de combustibles y en el de aire-gases. Los sistemas que a continuación detallamos están desarrollados principalmente desde el punto de vista del control, por lo que aunque no sólo se representa aquella instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de aquél en su operación continua o de seguridades, la instrumentación local, valvulería manual, filtros, drenajes, etc., que se incluye puede no ser completa.

1.3.1 Sistema agua-vapor

En la Figura 1-9 podemos observar el circuito agua-vapor de una caldera acuotubular con calderín. En él se han diferenciado los instrumentos propios del sistema de control continuo de los de seguridades marcando mediante una circunferencia aquéllos y un rombo éstos, inscritos en un cuadro.

En este circuito podemos observar como el agua de alimentación, a las condiciones de presión y temperatura adecuadas, procedente del sistema de bombeo es suministrada al calderín a través de un economizador en el cual se incrementa su temperatura. El vapor saturado generado se separa en el calderín y al salir de él es enviado a un sobrecalentador primario en donde se eleva parcialmente su temperatura. Este vapor ya sobrecalentado es atemperado antes de enviarlo a un sobrecalentador final tras el cual es suministrado a los consumidores existentes.

Se muestra también el circuito de vapor a los sopladores. Este vapor se tomará dependiendo de la instalación de diferentes sitios.

Las variables que hay que vigilar en este circuito desde el punto de vista de las seguridades de la caldera serán las siguientes:

a) Al ser una caldera de nivel de agua definido debe existir protección al menos por bajo nivel, a fin de impedir que los tubos de caldera sufran daños debido a la falta de refrigeración. En algunos casos, dependiendo de la caldera o del uso del vapor, existe protección por alto nivel para evitar que el agua pueda pasar al sobrecalentador o contaminar el vapor hacia posibles turbinas. Para la medida del nivel se representan transmisores de presión diferencial (LT), cuya

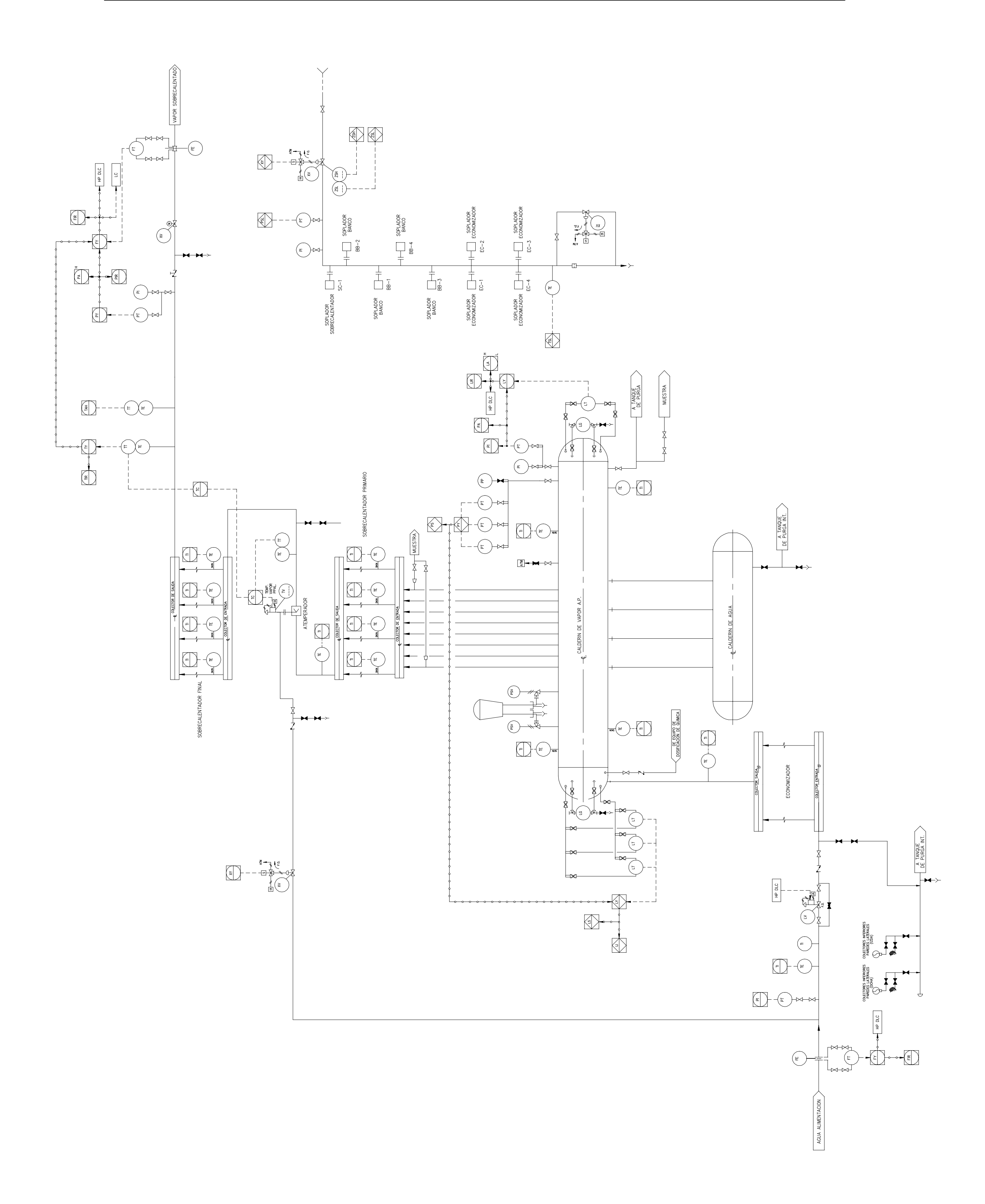


Figura 1-9. Circuito agua-vapor

lectura debe ser corregida por la presión del calderín al influir ésta en la densidad del agua, y por lo tanto en una medición de este tipo.

b) La caldera es un aparato a presión, por lo que está sujeta al reglamento de aparatos a presión (RAP) vigente en España. El RAP exige el corte de la aportación calorífica cuando la presión del calderín excede un valor establecido. Dicho valor debe estar por debajo del valor fijado para el disparo de la primera válvula de seguridad del calderín. Estas mediciones se representan mediante transmisores de presión (PT).

Las variables a controlar para mantener una producción de vapor continua en las condiciones deseadas serán las siguientes:

a) Al ser una caldera de nivel de agua definido, éste debe mantenerse en su nivel normal de operación para conseguir un funcionamiento adecuado de la caldera. Para conseguir este objetivo se medirán: el nivel (LT), la presión (PT) para la corrección de aquél si fuese necesario, el caudal de agua de alimentación (FT) y el caudal de vapor (FT). Estas medidas de caudal deben ser corregidas, por temperatura y por presión y temperatura respectivamente si su medición está basada en la presión diferencial y existen importantes variaciones en estas variables. La cantidad de agua aportada en cada momento se manipulará mediante una válvula de control (LV).

b) El vapor que se produce debe mantenerse en unas condiciones óptimas de presión y temperatura, por lo cual se tomarán medidas de la presión final del vapor sobrecalentado (PT) y de su temperatura (TT). La presión se mantendrá en el valor deseado mediante la aportación del combustible necesario. Para mantener la temperatura de vapor adecuada se usará una válvula de control (TV) que añadirá el agua de atemperación requerida. Dicha válvula se instalará entre las dos etapas de sobrecalentamiento. Finalmente, por motivos de control que se verán más adelante se medirá la temperatura (TT) del vapor a la salida de la primera etapa de sobrecalentamiento.

c) El circuito de vapor para el sistema de sopladores incluye una válvula de corte que permite el paso o no del vapor, de una válvula de drenaje que se usa para evacuar el condensado así como para realizar el calentamiento de la línea, y de una medida de presión (PT) y otra de temperatura (TT) que se utilizan como seguridades de este sistema.

1.3.2 Sistema aire-gases

Un típico circuito aire-gases de una caldera de tiro forzado lo podemos ver en la Figura 1-10. Se han diferenciado los instrumentos propios del sistema de control continuo de los de seguridades de igual forma a como se hizo en el caso anterior.

En este circuito podemos observar como el aire es impulsado por el ventilador de tiro forzado que tras pasar por la caja de aire y los registros de los quemadores, en donde se produce la turbulencia necesaria para una combustión correcta, se

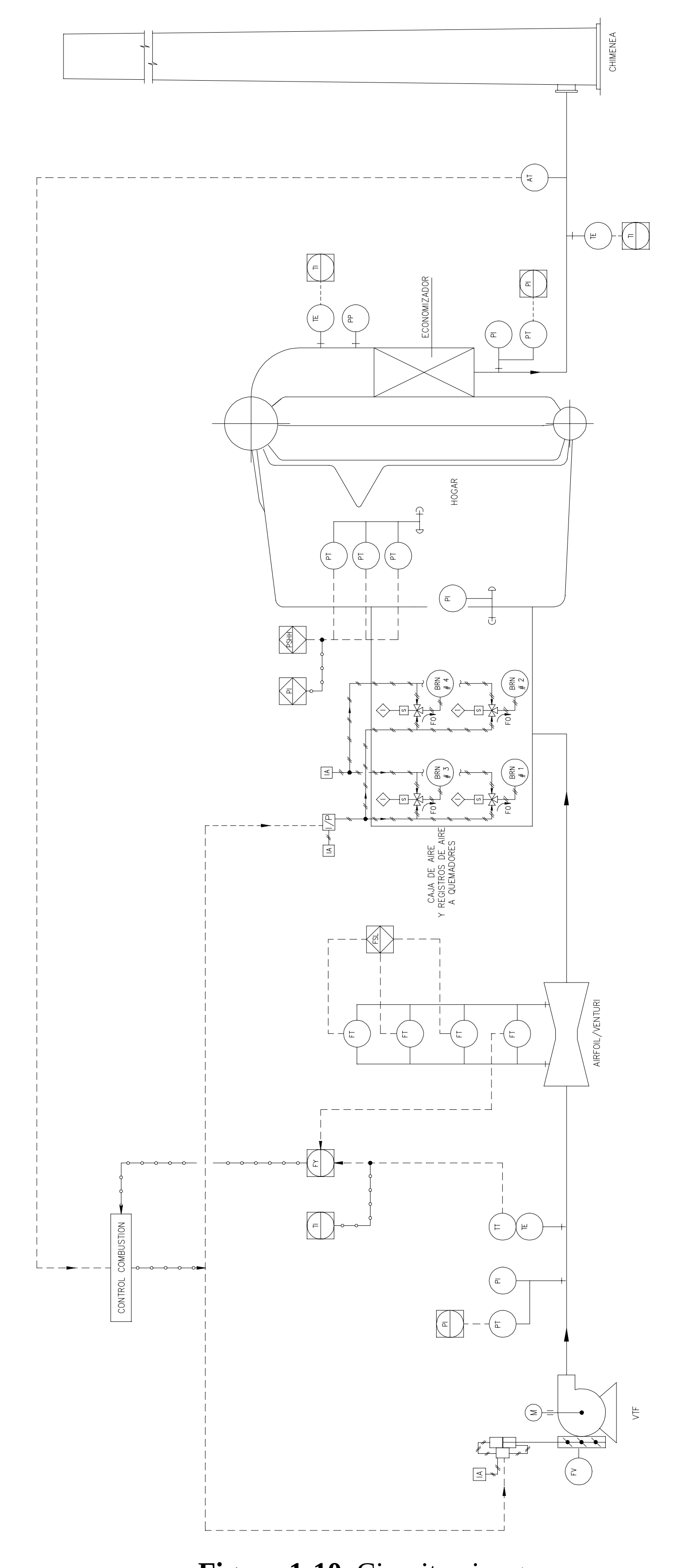


Figura 1-10. Circuito aire gases

introduce en el hogar. Una vez en él y tras producirse la combustión, los gases abandonan el hogar para pasar por el economizador y entregar parte de su calor antes de alcanzar la chimenea.

Las variables que hay que vigilar en este circuito desde el punto de vista de las seguridades de la caldera serán las siguientes:

a) Una de las variables más importantes con relación a la seguridad es el caudal de aire de combustión que se está suministrando al hogar. Para asegurarnos que este suministro es continuo y mayor que un mínimo, se supervisará que el ventilador de tiro forzado está en servicio (señal que se obtendrá desde el contactor del ventilador) y que el caudal de aire de combustión no es bajo (FT). Adicionalmente, se obtendrá de ésta medida el caudal mínimo necesario para realizar una purga de la unidad correcta antes de su encendido. Esta medida debe corregirse cuando existan grandes variaciones de la temperatura del aire si está basada en presión diferencial.

b) Al estar el hogar diseñado para soportar una presión determinada, se debe proteger éste por alta presión (PT) para evitar posible deformaciones de la envolvente. Si la caldera fuera de tiro inducido la protección debiera ser por depresión y si fuese de tiro equilibrado por ambas causas.

c) Al existir una compuerta o álabes de entrada al ventilador para su modulación, se debe disponer de las posiciones de cerrado, para su arranque y de abierto para la supervisión de su correcto posicionamiento tras establecerse el máximo tiro natural en caso de pérdida del ventilador. Si existiesen más compuertas en el circuito, o en el caso de registros de aire, será necesaria al menos la indicación de abierta de cada una de ellas para la determinación del tiro natural.

Las variables a controlar para mantener un caudal de aire adecuado que garantice una correcta combustión en las mejores condiciones de eficiencia y seguridad serán las siguientes:

a) Al ser una caldera capaz de operar a distintas cargas entre un mínimo y un máximo, el caudal de aire de combustión deber ser ajustado a la cantidad adecuada para la cantidad de combustible que se está suministrando. Para ello se necesitará la medida de caudal de aire (FT) y un actuador sobre los álabes de entrada del ventilador al objeto de poder modificar su apertura y por tanto la aportación de caudal. Si las condiciones de temperatura del aire pueden variar sensiblemente es aconsejable la medición de la temperatura (TT) de éste para la corrección de la medida de caudal de aire si la medida de éste se obtiene mediante una lectura de presión diferencial.

b) A fin de que la combustión sea lo más eficaz posible, manteniendo el exceso de aire lo más bajo posible, se medirá el exceso de oxígeno existente en los gases.

c) Dependiendo del tipo de quemadores que se usen, los registros de aire de éstos pueden o no tener que ser modulados, de acuerdo con la carga, para generar

las turbulencias necesarias para una buena combustión. En este caso se necesitará un actuador que modifique su posición.

1.3.3 Sistema combustibles

En la Figura 1-11 se ha representado el circuito de combustibles de una caldera de cuatro quemadores mixtos para fuel oil y gas natural. Los ignitores se han supuesto de gas natural también. Se han diferenciado los instrumentos propios del sistema de control continuo de los de seguridades como en los casos anteriores.

Los circuitos que se muestran están basados en el estándar NFPA 8502 para calderas de múltiples quemadores.

En este circuito podemos observar la distribución de los combustibles para los cuatro quemadores existentes. La línea de gas, al usarse como combustible de los quemadores principales y del ignitor, se ramifica en dos líneas, una para cada propósito. Cada una de estas líneas a su vez se ramifica en cuatro, yendo cada rama a cada uno de los quemadores y terminando en un venteo que permite la despresurización del colector. Las líneas de fuel oil y de vapor de atomización, necesario para la correcta atomización de este combustible, igualmente se ramifican en cuatro, una rama para cada quemador, existiendo una línea de recirculación que permite el acondicionamiento del fuel oil a sus condiciones de operación.

Desde el punto de vista de la seguridad, en el circuito de combustibles no sólo se deben tener en cuenta que las variables críticas de éstos se han de mantener dentro de los límites necesarios, sino que además al ser necesaria la seguridad del cese del aporte del combustible, será necesaria la instalación de una serie de válvulas que aseguren dicho cese en los momentos requeridos, bien individualmente por quemador, bien globalmente por combustible. Por ello deberán existir las siguientes válvulas de corte:

a) Ignitores. Se instalará una válvula general de corte, con su correspondiente válvula de venteo en el colector, y dos válvulas de corte en serie, con su venteo intermedio, para cada uno de los ignitores.

b) Quemadores de gas. Se instalarán las mismas válvulas que en los ignitores, existiendo además, en paralelo con la válvula de corte principal una pequeña válvula de carga del colector al objeto de poder realizar el test de fugas de éste. Todas las válvulas de este sistema han de tener al menos indicación de posición cerrada. En el caso de los venteos esta indicación se suele sustituir por la de abierta.

c) Quemadores de fuel oil. Se instalará una válvula de corte general así como una válvula de retorno o recirculación para permitir alcanzar al combustible sus condiciones adecuadas de operación. En paralelo con la válvula general de corte se instalará una pequeña válvula de circulación al objeto de permitir efectuar el test de fugas, así como circular el combustible para su adecuación.

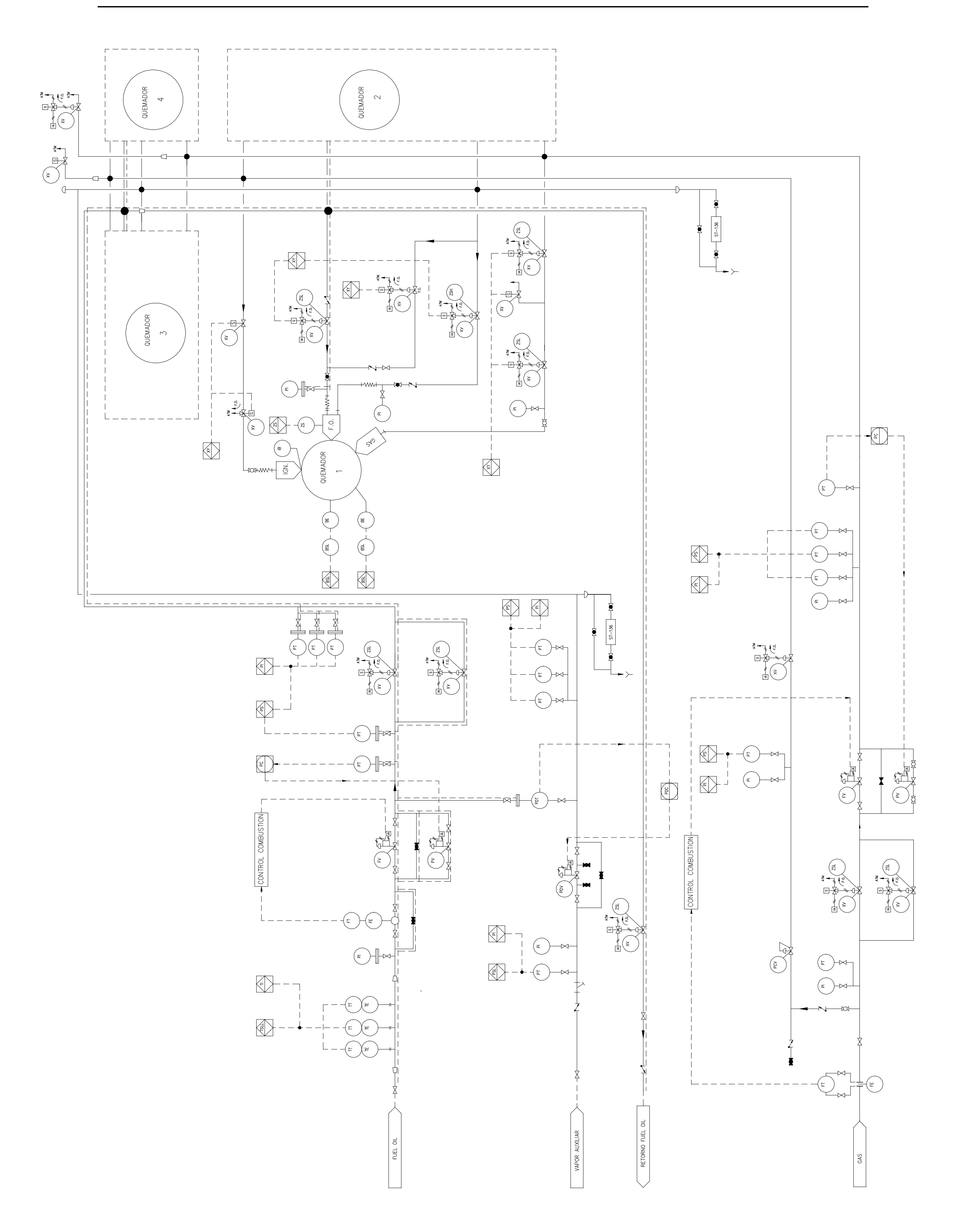


Figura 1-11. Circuito combustibles

Adicionalmente, existirá una válvula de corte individual por cada quemador. Todas las válvulas de este circuito han de tener indicación de cerradas. Además, al ser habitualmente las lanzas de los quemadores de fuel oil desmontables en operación para su correcto mantenimiento, se suelen instalar finales de carrera en ellas que indiquen su posición de acopladas.

Por otra parte, las variables que hay que vigilar en este circuito, desde el punto de vista de las seguridades de la caldera serán las siguientes:

a) Presión de gas a ignitores (PT) no baja y no alta que asegure la correcta combustión.

b) Presión de gas a quemadores (PT) no alta y no baja que asegure la correcta combustión y el no sobrepasar la aportación máxima de este combustible.

c) Presión de fuel oil a quemadores (PT) no baja que asegure la correcta combustión. Es aconsejable vigilar también la presión no alta para asegurar que no se excede la máxima aportación.

d) Temperatura de fuel oil (TT) no baja que asegure que el combustible tiene el grado de viscosidad adecuado para su correcta combustión. Es aconsejable también vigilar la temperatura no alta que puede provocar gasificaciones del combustible.

e) Presión diferencial fuel oil- vapor (PT junto con PT de combustible) no baja que asegure la correcta atomización del combustible.

f) Existencia de llama (BE) que asegure que el combustible que se introduce en el hogar está siendo quemado.

Las variables a controlar para mantener un caudal de combustible adecuado, para la carga de caldera existente en cada momento, serán las siguientes:

a) Gas natural. Para poder modular correctamente la aportación de gas natural de acuerdo con la carga de caldera se necesitará la medida de caudal de gas (FT) y una válvula de control (FV) al objeto de poder modificar la aportación de caudal. Si las condiciones de presión y temperatura del gas pueden variar sensiblemente, es aconsejable la medición estas variables para la corrección de la medida de caudal de gas si la medida de éste se obtiene de una lectura de presión diferencial. También se suele instalar, en paralelo con la de control principal, una válvula de control (PV) para asegurar la mínima presión a quemadores (PT), especialmente durante las secuencias de encendido y apagado de éstos.

b) Fuel oil. Para poder modular correctamente la aportación de fuel oil de acuerdo con la carga de caldera se necesitará, la medida de caudal de fuel oil (FT) y una válvula de control (FV) al objeto de poder modificar la aportación de caudal. Si las condiciones de temperatura del fuel oil pueden variar sensiblemente es aconsejable la medición de estas variables para la corrección de la medida de caudal por temperatura si ésta se obtiene de una lectura

volumétrica. Al igual que en el caso anterior, se suele instalar, en paralelo con la de control principal, una válvula de control (PV) para asegurar la mínima presión a quemadores (PT), especialmente durante las secuencias de encendido y apagado de éstos.

c) Vapor de atomización. Para poder atomizar correctamente a distintas cargas de fuel oil hay que asegurar una presión diferencial vapor-fuel oil constante, para lo cual se necesitará la medida de dicha presión diferencial (PDT) y una válvula de control de vapor (PDV) que modifique el caudal de vapor de atomización para mantener dicha presión diferencial.

1.3.4 Sistemas auxiliares

En la Figura 1-12 se muestra un circuito típico de agua de alimentación. En él, el agua/condensado se mezcla con vapor en el desgasificador para liberar al agua de los gases disueltos que lleve. Esta agua ya desgasificada se envía a la caldera a través de un sistema de bombeo.

También se muestra en esta figura el circuito de purga de la caldera. El agua del calderín se envía al tanque presurizado de purga continua, donde hace de sello para poder enviarla al de purga intermitente, que es atmosférico.

Aunque ninguna de las variables de este circuito influye de forma directa en las seguridades de la caldera, si cabe considerar la medida de nivel del desgasificador (LT) para la seguridad de rebose por alto nivel y para la de arranque de las bombas por bajo nivel.

Las variables a controlar para el correcto funcionamiento del desgasificador y el tanque de purga continua serán:

a) Desgasificador. Para mantener un nivel adecuado de agua que garantice un suministro continuo de agua a la caldera, es necesario la lectura de dicho nivel (LT) y una válvula de control (LV) que nos permita modificar la aportación de acuerdo con las necesidades. Por otra parte, para poder mantener la presión en el valor de trabajo que asegure la desgasificación, se necesita una medida de presión (PT) y una válvula de control (PV) que modifique la aportación de vapor.

b) Tanque de purga. Para mantener un nivel de agua estable que mantenga un sello de agua, necesitaremos una medida del nivel (LT) del tanque y una válvula de control que module el caudal de desagüe (LV).

En la Figura 1-13 se muestra un circuito de preparación de fuel oil. En él, el fuel oil del tanque se bombea a través de unos calentadores, en donde incrementará su temperatura hasta la de operación, al circuito de combustible de los quemadores.

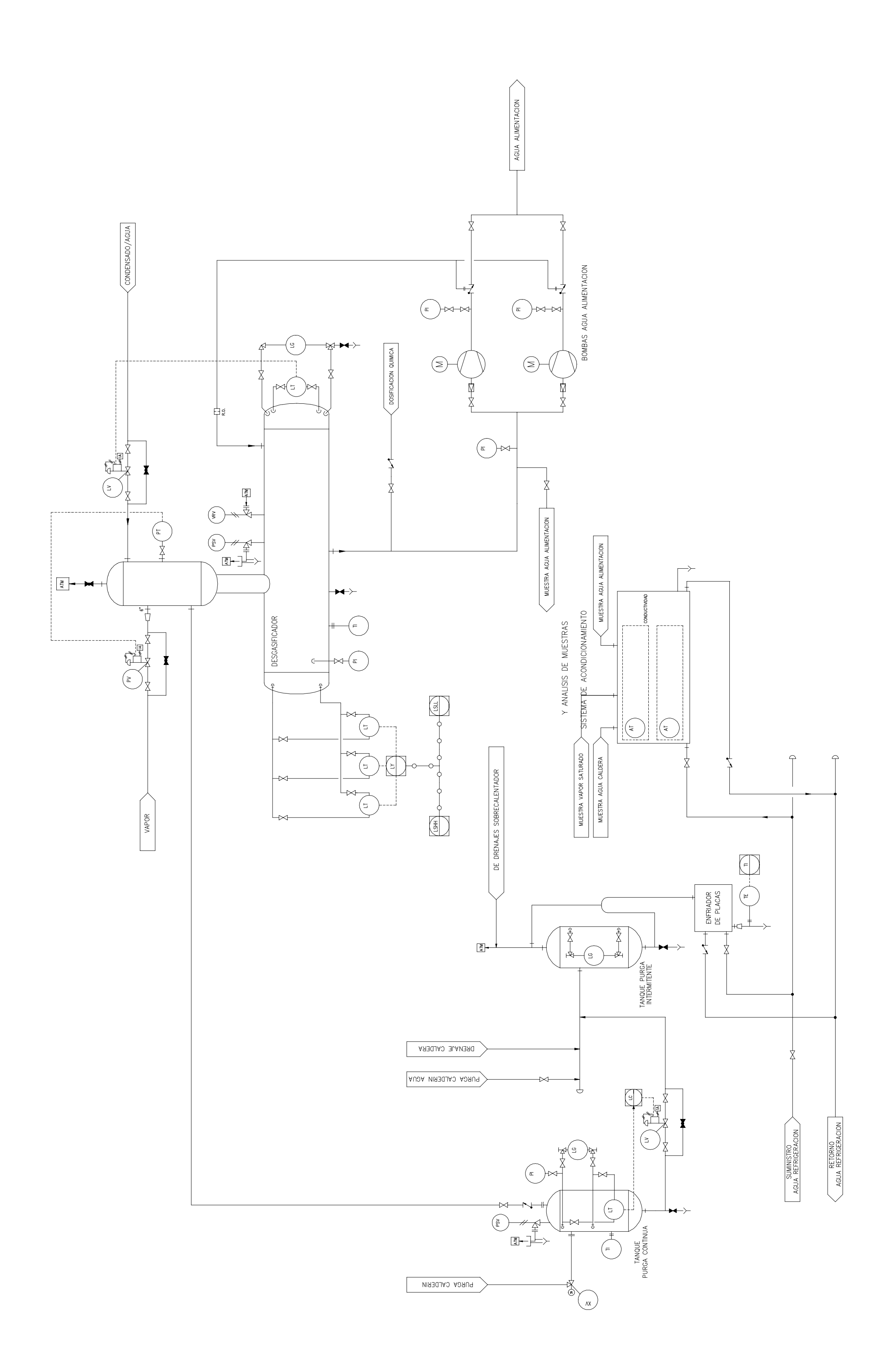


Figura 1-12. Circuito de agua de alimentación y purga

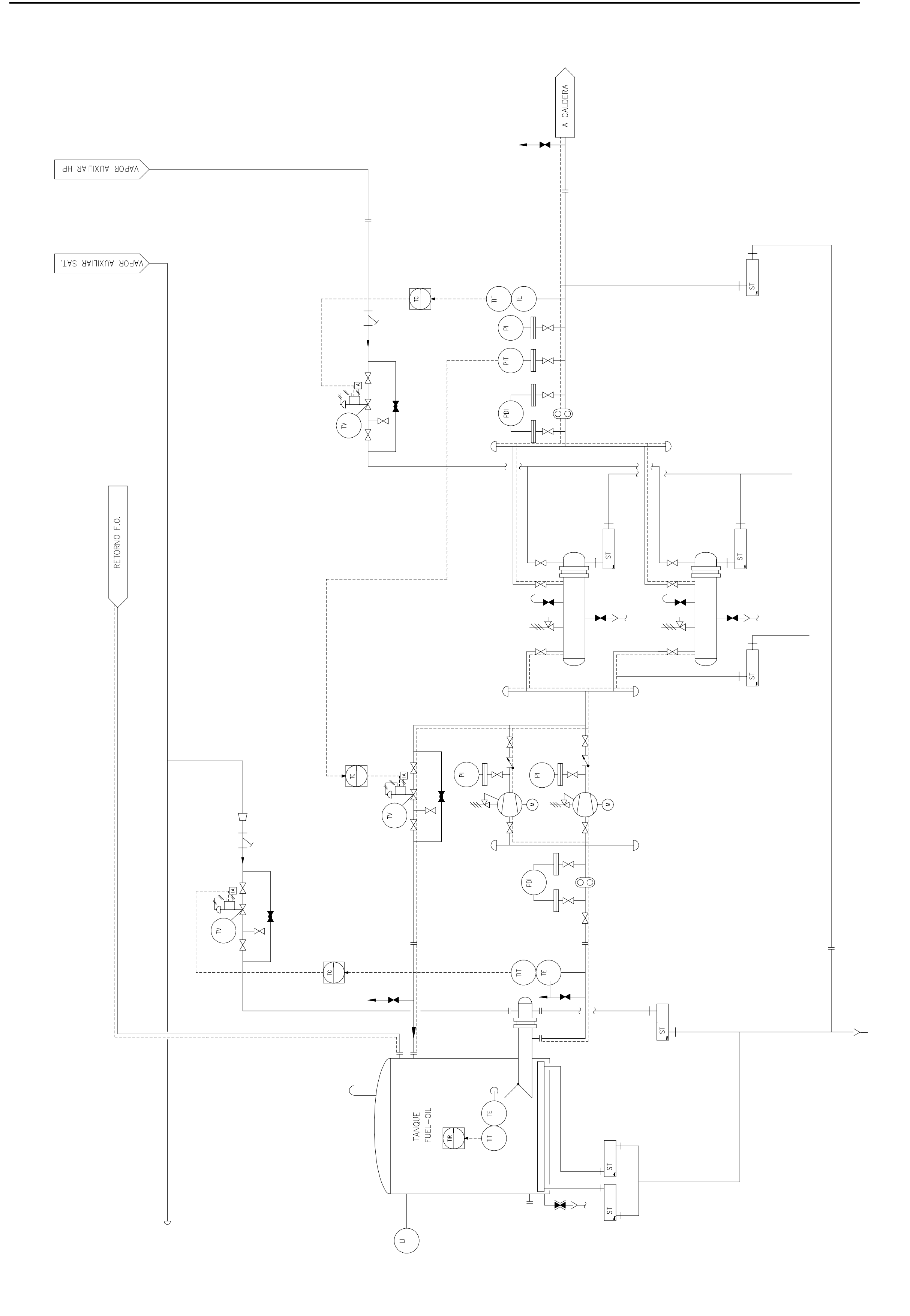


Figura 1-13. Circuito de preparación fuel oil

Las variables a controlar para el correcto funcionamiento de este circuito serán:

a) A fin de mantener la presión de suministro de fuel oil en su punto de funcionamiento, se necesitará la medida de ésta a la salida del circuito (PT) y una válvula de control (PV) en un retorno hacia el tanque que permita modificar este caudal.

b) A fin de mantener la temperatura, se necesitará la medida de ésta (TT) y una válvula de control (TV) que modifique el caudal de vapor a través de los calentadores y por tanto la temperatura del fuel oil.

1.4 Calderas de recuperación de calor

Aunque el diseño de estas calderas difiere mucho del de las calderas industriales vistas anteriormente, la verdad es que desde el punto de vista del control y la seguridad la similitud en sus sistemas es bastante grande. Aunque existen multitud de diseños de calderas de recuperación de calor, el texto se centrará en el ejemplo escogido que intenta aglutinar la mayoría de posibilidades existentes en este tipo de calderas.

1.4.1 Sistema agua-vapor

En la Figura 1-14 se puede observar el circuito agua-vapor de una caldera acuotubular con calderín. Los instrumentos propios del sistema de control continuo de los de seguridades se han diferenciado como en los casos anteriores.

Como se ve, el circuito es igual al de las calderas industriales con la diferencia de que suele ser habitual la existencia de varios niveles de presión. Estos niveles de presión suelen tener la misma estructura, a excepción quizás de que en los niveles de baja suele haber una única etapa de sobrecalentamiento. Como el combustible habitualmente utilizado en estas calderas es gas natural, no suele haber una extracción para el vapor a los sopladores de hollín al no existir éstos.

Las variables que hay que vigilar tanto desde el punto de vista de las seguridades de la caldera como del de control serán las mismas que en el caso de las calderas industriales.

1.4.2 Sistema aire-gases

Un típico circuito aire-gases de una caldera de recuperación lo podemos ver también en la Figura 1-14.

Este circuito por la particularidad de usar, bien los gases de escape de la turbina bien el aire suministrado por el ventilador de aire fresco como aire de combustión de los quemadores, y por poder trabajar en ciclo simple o combinado, sí presenta diferencias importantes con respecto al visto para el caso de las calderas industriales.

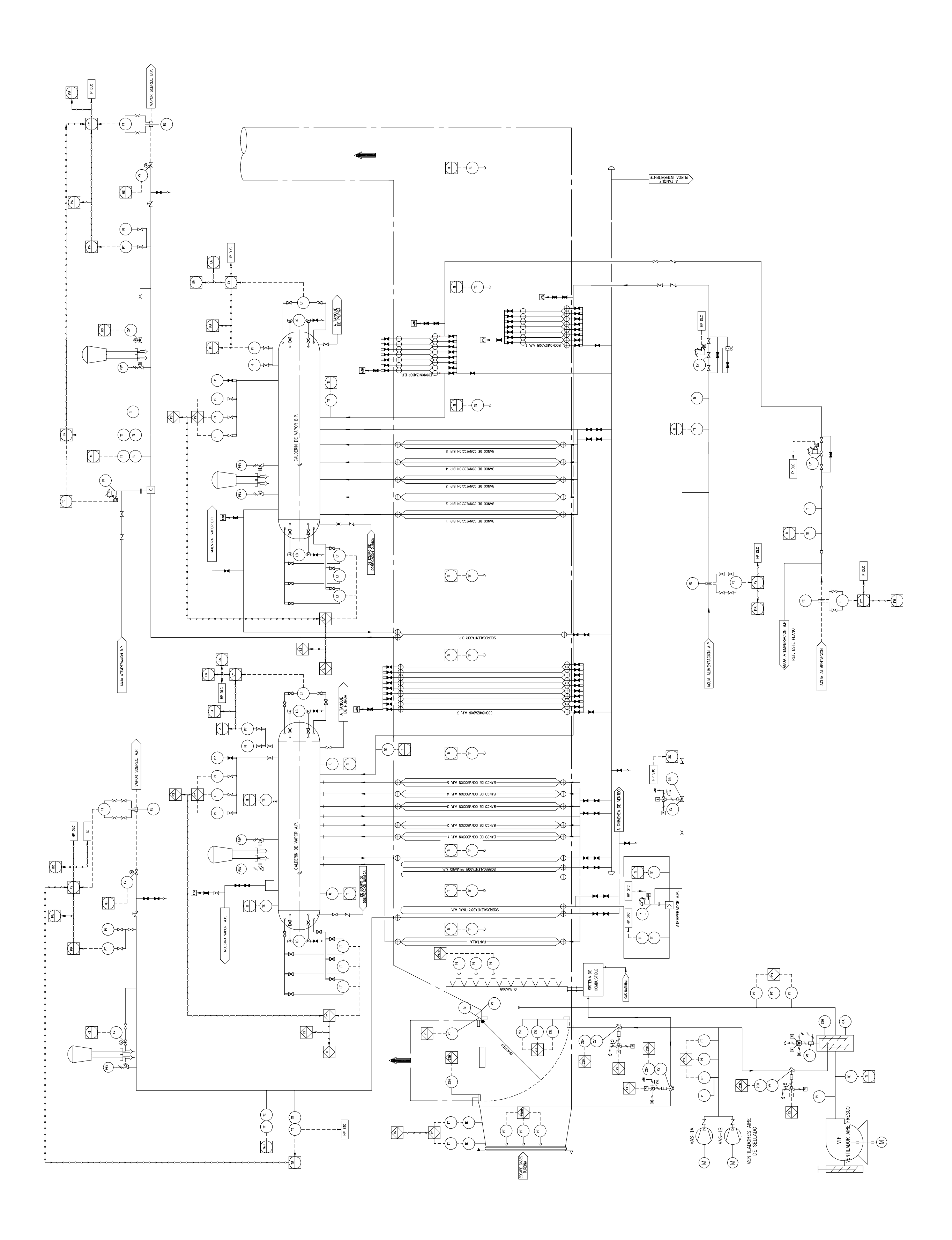


Figura 1-14. Circuito de agua-vapor y aire gases

Para poder trabajar en modo gases turbina o en modo aire fresco se dispone de unas compuertas de aislamiento, tanto en la salida de la turbina como en la del ventilador, que trabajarán en oposición de acuerdo con el modo de operación. Dichas compuertas deben tener indicación de sus posiciones límite de abierta/cerrada de forma que se pueda confirmar su correcto posicionamiento en los distintos modos.

Para poder trabajar en el modo de gases de turbina, bien en modo simple, bien en modo combinado, se instalará una chimenea de bypass con su correspondiente diverter (se puede sustituir por dos compuertas, una al bypass y la otra a la caldera) de forma que se pueda aislar la turbina de la caldera y trabajar aquélla en modo simple hacia el bypass. Por motivos de seguridad en estos dos modos de operación, este diverter deberá llevar igualmente indicación de posiciones límites abierta/cerrada.

Además de dichas posiciones de acuerdo con el modo de operación, las variables que hay que vigilar desde el punto de vista de las seguridades de la caldera serán las siguientes:

a) Modo gases de turbina. En este modo, al estar asegurado el caudal de aire por la operación de la turbina, se permitirá inferir el mínimo caudal de aire de la operación de ésta.

b) Modo aire fresco. En este modo, las señales de ventilador funcionando y de presión (PT) de descarga del ventilador no baja asegurarán la existencia de aire de combustión.

c) En ambos modos se supervisará la presión (PT) de los gases de escape de la turbina a fin de no someter a ésta a presiones en la descarga superiores a aquellas para las que ha sido diseñada.

d) En el caso de que exista quemador/es deberá supervisarse la presión (PT) de hogar a fin de que no supere los valores máximos establecidos.

e) De forma análoga a lo explicado para las calderas industriales, si existiese cualquier elemento adicional a los comentados que pudiese ocasionar un cierre en el tiro de los gases debería contar con indicación de, al menos, posición abierta.

En estas calderas el control de caudal de aire de combustión pierde sentido al ser sólo posible en el modo de aire fresco y ser éste un modo alternativo no habitual que sólo se usa ante la imposibilidad de trabajar en ciclo combinado.

1.4.3 Sistema combustibles

En la Figura 1-15 se ha representado el circuito de combustibles de una caldera de recuperación con dos quemadores de gas natural. Los ignitores se han supuesto de gas natural también. Se han diferenciado los instrumentos propios del sistema de control continuo de los de seguridades como en los casos anteriores.

En este circuito podemos observar la distribución de los combustibles para los dos quemadores existentes. La línea de gas natural, al usarse como combustible de los quemadores principales y del ignitor se ramifica en dos líneas una para cada propósito. Cada una de estas líneas a su vez se ramifica en dos, yendo cada rama a cada uno de los quemadores y acabando en un venteo.

Aún con el mismo propósito que comentamos para las calderas industriales, en el circuito de combustibles de las calderas de recuperación existen algunas pequeñas diferencias en la distribución de las válvulas de corte que deben existir. Estas serán las siguientes:

a) Ignitores. Se instalarán dos válvulas generales de corte con sus correspondientes válvulas de venteo, entre ellas y en el colector, y una válvula de corte para cada uno de los ignitores.

b) Quemadores de gas. Se instalarán las mismas válvulas que en los ignitores. Todas las válvulas de este sistema han de tener al menos indicación de posición cerrada. En el caso de los venteos esta indicación se suele sustituir por la de abierta.

Cuando la caldera dispone de aire fresco, se debe incluir doble válvula de corte con su correspondiente venteo en cada ignitor y quemador.

Por otra parte las variables que hay que vigilar serán las mismas que en el caso de las calderas industriales para estos combustibles.

1.4.4 Sistemas auxiliares

Los sistemas auxiliares de este tipo de calderas no difieren de lo explicado para las calderas industriales.

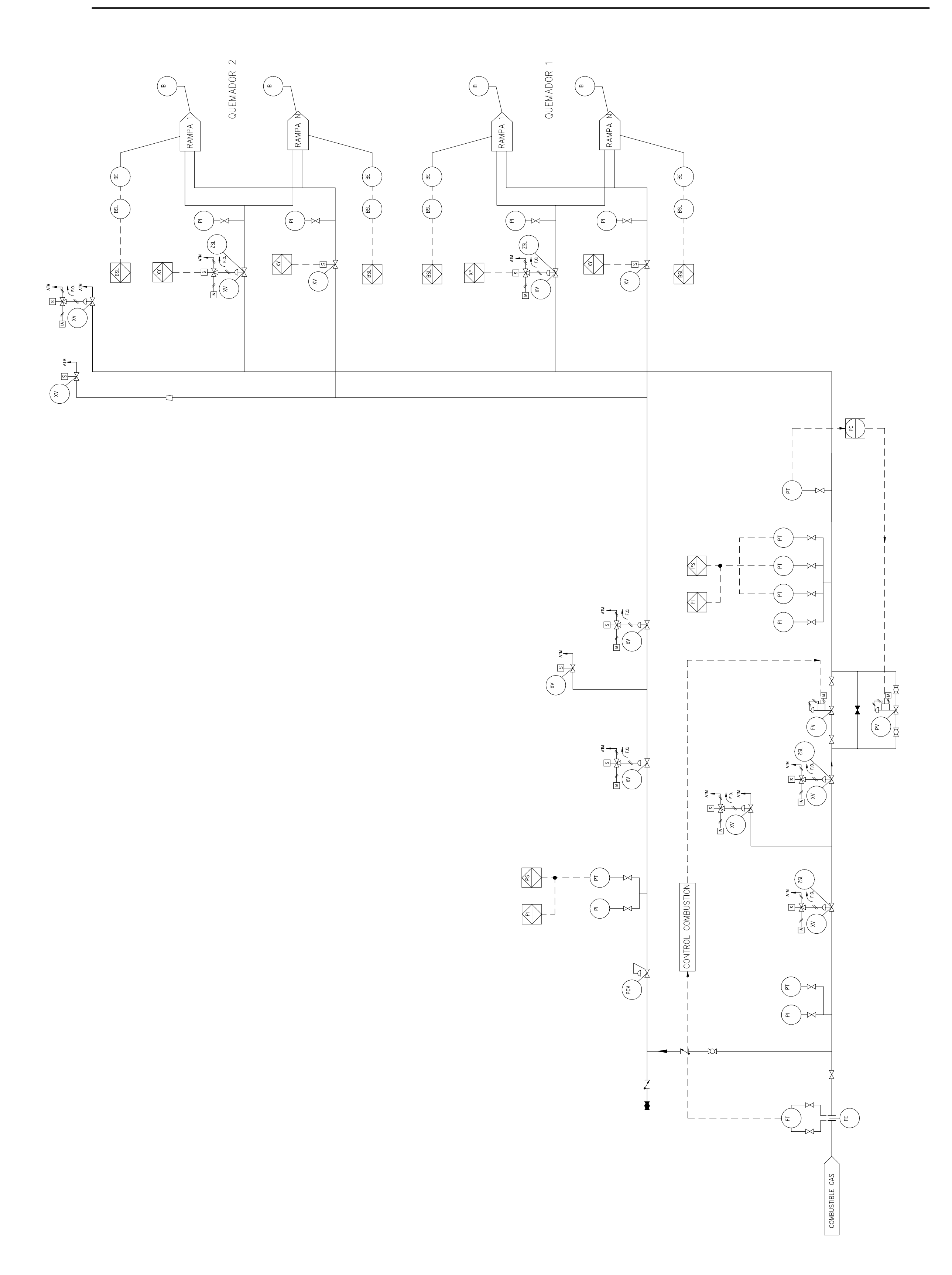


Figura 1-15. Circuito de combustibles

2 SEGURIDADES DE CALDERA

2.1 NORMAS

2.1.1 Introducción

Existen hoy en día en todo el mundo muchas Normas o Estándares relacionados con la seguridad que poco a poco, sobre todo en los últimos años, están convergiendo hacia un único Estándar mundial que sea aceptado por todos o casi todos los países.

Existen diversidad de Asociaciones, Instituciones u Organismos públicos y privados cuya misión, entre otras, es la elaboración de Normas, enfocadas hacia distintos aspectos de la seguridad (proceso, sistema electrónico, instrumentación, software/hardware, etc.) y dependiendo de los intereses que defienden.

En el caso de las Calderas también existen varias Normas o Estándares aplicables, y con poco margen de error podemos decir que la más utilizada a nivel mundial es la americana NFPA (National Fire Protection Association). Desde el punto de vista de la funcionalidad del sistema de seguridades de caldera se utiliza cada vez más la nueva IEC 61508.

2.1.2 ¿Qué Ofrecen las Normas y Estándares?

Una de las razones por las que la industria escribe sus propias Normas y recomendaciones es la de evitar la regulación por parte de las autoridades públicas. Puesto que las industrias son responsables de sus accidentes, si no se regulan ellas mismas lo harían las autoridades. Normalmente estas intervienen cuando se detectan riesgos que producen alarma social.

Podemos citar las siguientes ventajas que nos ofrecen las Normas:

- Experiencias en Todo el Mundo.

  Los distintos Comités de cada Organismo van analizando las causas de los accidentes que se producen y como consecuencia revisan las Normas.

  La tendencia en los últimos 25 años ha sido clara. Cada vez las Normas son más exigentes en la seguridad.

- Permite la comparación imparcial de soluciones.

    - Son independientes de la tecnología utilizada.

    - Son valoradas y aprobadas por Organismos competentes (terceros)

- Ahorro de Capital y Gastos Operacionales.

    Confeccionar una buena especificación sobre seguridad no está al alcance de todos. Requiere personal muy especializado. En caso contrario lo más recomendable es exigir el cumplimiento de determinadas Normas que han sido elaboradas y consensuadas por Comités de expertos.

    - Sin costes inesperados

    - Principio del Ciclo Global de Seguridad

    - Sin gastos en Conocimiento Tecnológico

    - Metodología de Diseño

    - Experiencia en Validaciones

2.1.3 Aplicación de Normas y Estándares

Podemos dividir las Normas en dos grupos:

- Estándares propios de la Compañía

    Por desgracia es muy habitual encontrar especificaciones muy antiguas que han sido revisadas por personal no suficientemente cualificado con resultados nefastos. Podemos encontrarnos requisitos opuestos u obsoletos o requerimientos que contradicen las recomendaciones de Normas internacionales.

    - Basados en las experiencias de las empresas

    - Referenciados a Normas y Estándares internacionales (IEC, DIN, …)

    - Requieren la validación por autoridades de inspección (TÜV, UL, …)

- Cuando no existen, entonces se aplican:

    - Estándares internacionales (ISO, IEC, …) o

    - Estándares nacionales (DIN, BS, ANSI, …) o

    - Normativas de Organizaciones (ISA SP84, TÜV booklet, …) y

- Validación por una autoridad de inspección independiente (TÜV, UL, …)

En cualquiera de los casos el fin último es la reducción del Riesgo y del Coste.

2.1.4 Historia de los Estándares de Seguridad

- 1984 Normativas TÜV
  - Orientadas hacia Tecnología de Microprocesadores
- 1989 DIN 19250 / VDE 0801
  - Orientadas hacia las Aplicaciones, considerando principalmente resoluciones lógicas
- 1994 Apéndice a VDE 0801
  - Armonización con Estándares Internacionales Emergentes
- 1996 ISA SP84
  - Ciclo de Vida de Seguridad, aproximación Cuantitativa
- 1997 IEC-61508
  - Orientada a Aplicaciones, considerando el lazo completo
  - Ciclo de Vida de Seguridad, aproximación Cualitativa y Cuantitativa

En la siguiente figura se muestra la evolución histórica de los Sistemas de Seguridad.

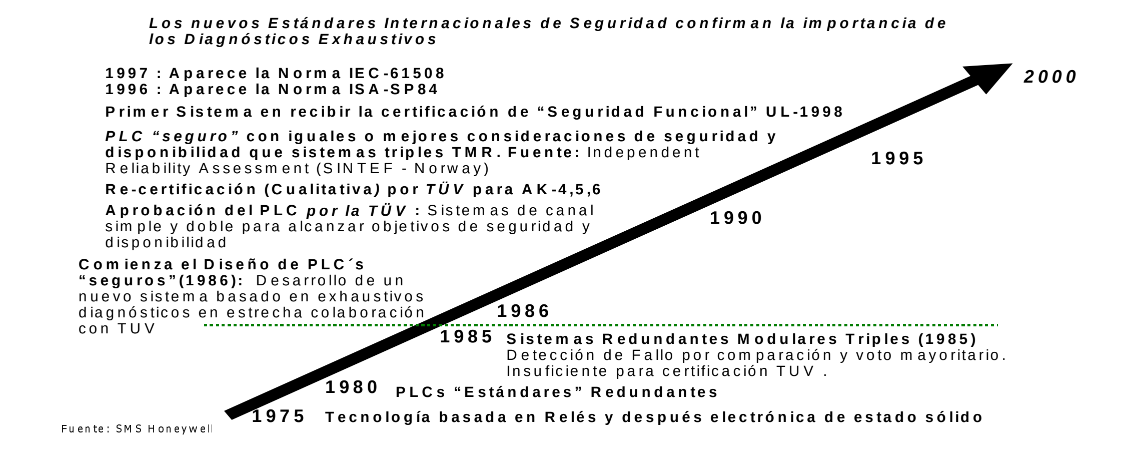


Figura 2-1. Historia de los Estándares

2.1.5 Desarrollo de los Estándares de Seguridad

Que la tecnología sea cada vez más habitual en nuestra vida diaria hace que se produzcan cada vez más accidentes por fallos en esa tecnología. Esto hace que sea necesario establecer en los sistemas unos mínimos requerimientos de seguridad para la protección de:

- Vidas humanas
- Equipos y productos
- Medio ambiente

Hay que asegurarse que se cumplen estos mínimos requerimientos de seguridad. La verificación debe ser:

- Objetiva
- De acuerdo a unas bases en general aceptadas
- Fácilmente comprensible
- Independiente del fabricante

de forma que los distintos productos y sistemas puedan ser comparados en relación a las mismas bases.

Durante alrededor de 100 años se han establecido diversas regulaciones y estándares siguiendo al avance tecnológico. Uno de los estándares de seguridad más conocido fue el DIN VDE 0116 ("Electrical Equipment of Furnaces"). Contiene instrucciones en relación al diseño de los controles de hogares en quemadores de gas y fuel-oil.

Debido al progresivo aumento del uso de microprocesadores en sistemas de seguridades, TÜV-Alemania publicó en 1984 "Microcomputers in Safety-Related Technology". Las normas existentes fueron subdivididas en 5 clases de seguridad dependiendo de la severidad de los requerimientos, desde la Clase 1 (nivel más alto) a la Clase 5 (nivel más bajo).

El Estándar DIN V 19250 ("Fundamental Safety Considerations of Protective Equipment for Instrumentation and Control") fue publicado en 1990. Describe los procedimientos de clasificación, independientes de la aplicación, y está basado en las consideraciones sobre el riesgo realizadas en DIN 31000. Esto resultó en la creación de 8 Clases de Requerimientos (AK1…AK8) según se muestra en la Figura 2-2.

Este estándar fue complementado por el DIN V VDE 0801 ("Fundamentales of Computers in Safety-Related Systems") que describe los pasos posibles en sistemas de seguridad basados en microprocesadores de acuerdo a las Clases de requerimiento.

Al mismo tiempo, la IEC en su TC65 ("Technical Committee 65, Industrial Process and Measurement Control") elaboró tres estándares internacionales considerando los ya existentes alemanes (DIN) y otros estándares nacionales y recomendaciones. Basados en las 8 Clases de requerimientos de DIN, se establecieron cuatro Niveles de Integridad de Seguridad ("Safety Integrity Levels"; SIL 1 a SIL 4) a los que se asignaron distintos límites de fallos.

Los resultados obtenidos por el TC65 fueron los siguientes estándares:

- IEC-61508 "Functional Safety of Safety-Related Systems"
- IEC-61511 "Implementation of IEC-61508 for Process Industries"
- IEC-61131-3 "Standardization in Industrial Programming"

2.1.6 Estándar de Seguridad IEC-61508

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha estado trabajando durante los últimos años en un estándar que cubriera el uso de los relés, electrónica de estado sólido y los sistemas programables, incluyendo los dispositivos de campo.

El Estándar aplica a todas las industrias, tales como el transporte, medicina, nuclear, etc. y por este motivo no ha sido bien aceptado en algunos sectores. En estos momentos la Comisión está trabajando en el estándar IEC-61511 (Implementación de la IEC-61508 para las Industrias de Proceso).

El IEC-61508 es un estándar básico sobre seguridad. Su objetivo es facilitar la elaboración de estándares específicos a la aplicación.

El estándar describe los sistemas de control relativos a la seguridad (sistemas con funciones de seguridad) incluyendo sistemas/dispositivos eléctricos/electrónicos/ electrónicos y programables, llamados E/E/PES.

Está basado en 2 conceptos:

- Ciclo global de vida de seguridad, para el sistema E/E/PES y para el software.
- Niveles de requerimientos de seguridad (SIL= Safety Integrity Levels)

2.1.6.1 Partes del Estándar IEC-61508

Por su interés reproducimos a continuación las 7 partes de que consta el estándar según se indica en las páginas de la Web en inglés de la IEC en el momento actual (Octubre 2000):

IEC 61508-1 (1998-12)

Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements.

Sets out a generic approach for all safety lifecycle activities for systems comprised of electrical and/or electronic and/or programmable electronic components (electrical/electronic/programmable electronic systems (E/E/PESs)) that are used to perform safety functions. This unified approach has been adopted in order that a rational and consistent technical policy be developed for all electrically-based-safety-related systems. Is intended to facilitate the development of application sector standards. Has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

IEC 61508-1 Corr. 1 (1999-05)

Functional safety of electrical/electronic/programamable electronic safety-related systems - Part 1: General requirements.

IEC 61508-2 (2000-05)

Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems - Part 2: Requirements for safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems.

IEC 61508-3 (1998-12)

Functiontal safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.

Applies to any software forming part of a safety-related system or used to develop a safety-related system within the scope of IEC 61508-1 and 61508-2. Provides requirements: - for safety lifecycle phases and activities; - for information relating to the software safety validation; - for the preparation of information and procedures concerning software; - to be met by the organisation carrying out modifications to safety-related software; - for supporting tools. Has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

IEC 61508-3 Corr. 1 (1999-04)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.

IEC 61508-4 (1998-12)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 4: Definitions and abbreviations.

Contains the definitions and explanation of terms that are used in parts 1 to 7 of this standard. Intended for use by technical commitees in the preparation of standards in accordance with the principles contained in IEC Guide 104 and ISO/IEC Guide 51. IEC 61508 is also intended as a stand-alone standard. Has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

IEC 61508-4 Corr. 1 (1999-04)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 4: Definitions and abbreviations.

IEC 61508-5 (1998-12)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 5: Examples of methods for the determination of safety integrity levels.

Provides information on the underlying concepts of risk and the relationship of risk to safety integrity (see annex A); a number of methods that will enable the safety levels for the E/E/EPE safety-related systems, other technology safety-related systems and external risk reduction facilities to be determined (see annexes B, C, D and E). Intended for use by technical committees in the preparation of standards in accordance with the principles contained in IEC Guide 104 and ISO/IEC Guide 51. IEC 61508 is also intended as a stand-alone standard.

IEC 61508-5 Corr. 1 (1999-04)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 5: Examples of methods for the determination of safety integrity levels.

IEC 61508-6 (2000-04)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 6: Guidelines in the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3.

IEC 61508-7 (2000-03)

Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 7: Overview of techniques and measures.

IEC 61508: work in progress

IEC 61508-3 Amd. 1 Ed. 1.0

Maintenance procedure on IEC 61508-3: Functional safety of electrical/electronic/programable electronic safety-related systems - Part 3: Software requirements.

2.1.6.2 Partes del Estándar IEC-61511

Por su interés reproducimos a continuación las 3 partes de que consta el estándar según se indica en las páginas de la Web en inglés de la IEC en el momento actual (Octubre 2000):

IEC 61511: work in progress

IEC 61511-1 Ed. 1.0

Functional safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: General framework, definitions system software and hardware requirements.

IEC 61511-2 Ed. 1.0

Functional safety instrumented systems for the process industry - Part 2: Guidelines in the application of Part 1.

IEC 61511-3 Ed. 1.0

Functional safety: Safety instrumented systems for the process industry sector - Part 1: Guidelines in the application of hazard and risk analysis.

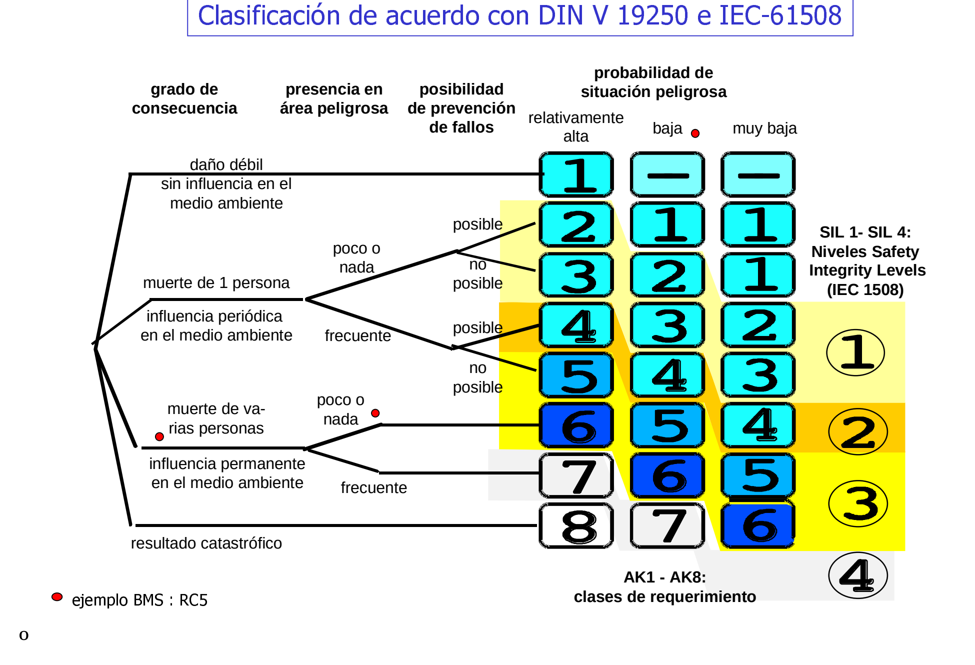


Figura 2-2. Clasificación

El riesgo de una planta se evalúa exactamente igual que en la DIN V 19250, es decir, las 48 teóricas posibles combinaciones correspondientes al grado de consecuencia (4 niveles), a la presencia en área peligrosa (2 niveles), a la posibilidad de prevención de fallos (2 niveles) y a la probabilidad de situación peligrosa (3 niveles), se reducen a 8 clases de riesgo.

Para el nivel de riesgo más bajo (clase 1) no se especifica ningún nivel de requerimiento de seguridad y para el nivel de riesgo más alto (clase 8) no es suficiente con un sistema E/E/PES. Agrupando las clases 2 a 7 llegamos a los 4 niveles SIL (Safety Integrity Level) que contempla la IEC-61508.

2.1.7 Normas de Calderas

Como ya dijimos anteriormente existen muchas Normas y además de distinto tipo. Aquí sólo citaremos las que consideramos más utilizadas y mundialmente aceptadas por usuarios e ingenieros.

- Desde el punto de vista del proceso:

    - NFPA 8501 - Single Burner Boiler Operation
    - NFPA 8502 - Furnace Explosions/Implosions in Multiple Burner Boilers
    - NFPA 8504 - Atmospheric Fluidized-Bed Boiler Operation

- NFPA 8506 - Heat Recovery Steam Generators

- TRD 411-415 - Oil Firing Systems on Steam Boilers

- DIN 4787, 4788 - German Standard for Gas/Oil-Burners

- Desde el punto de vista del sistema de seguridades:

  - IEC-61508 - Functional Safety-Related Systems

  - ISA SP-84.01 - Application of Safety Instrumented Systems for the Process Industries

  - DIN V 19250 - Fundamental Safety Considerations of Protective Equipment for Instrumentation and Control

  - DIN V VDE 0801 - Fundamentals of Components in Safety-Related Systems

  - NFPA (Capítulos "Burner Management System Logic")

- Normas españolas:

  - UNE-9-109-86 - Equipos de Instrumentación, Control, Alarma y Seguridades para Calderas.

  - RAP - Reglamento de Aparatos a Presión.

2.2 SISTEMAS DE SEGURIDADES

2.2.1 Introducción

¿Qué es un "Sistema de Seguridad"?

Los Sistemas de Seguridades están diseñados para proteger a las personas, equipos y entorno ante condiciones que puedan resultar peligrosas. En estos casos deben actuar inmediatamente llevando la planta o el equipo a una posición segura.

Con frecuencia el diseñador del Sistema de Seguridades cae en el error de no considerar al Sistema como algo "global". Se fija demasiado en una parte, por ejemplo el tipo de hardware a utilizar, y descuida otras partes creando lamentables cuellos de botella y puntos débiles.

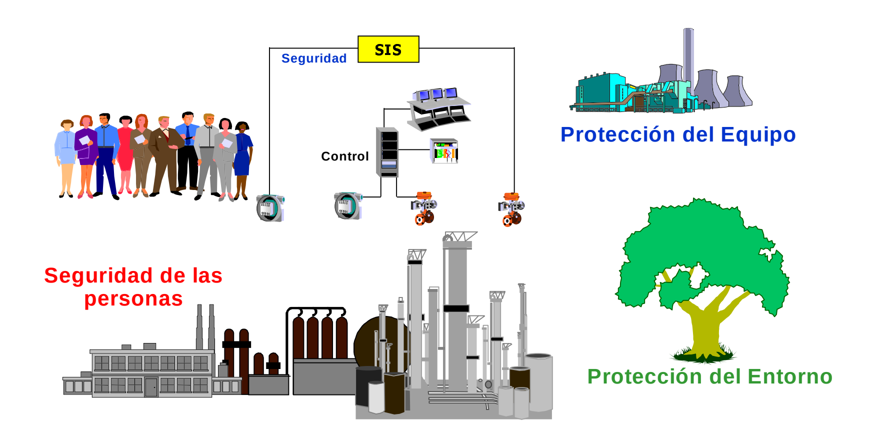


Figura 2-3. Objetivos del Sistema de Seguridad

El Comité Técnico de la IEC examinó 34 accidentes que fueron el resultado directo de fallos en los sistemas de control y seguridades en diferentes industrias.

El resultado es muy ilustrativo y se refleja en la Figura 2-4.

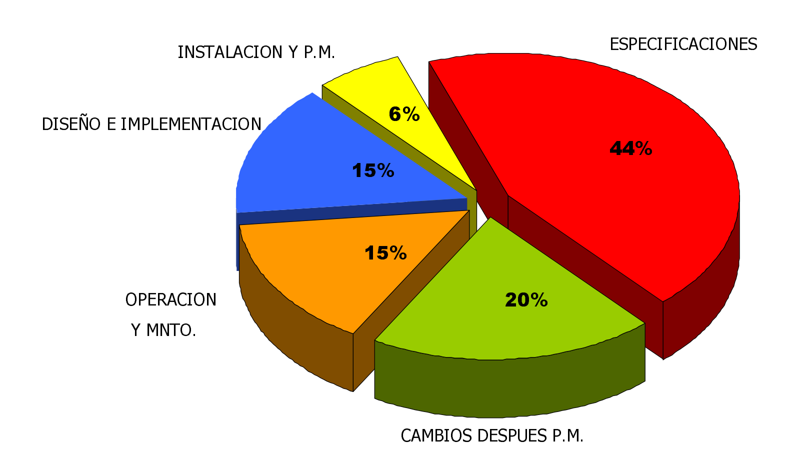


Figura 2-4. Causas de fallos

Es decir, casi la mitad de los errores fueron debidos a especificaciones incorrectas.

Como consecuencia de este estudio el Comité estableció unos requerimientos generales y estrategias para conseguir la seguridad funcional de los Sistemas de Seguridades.

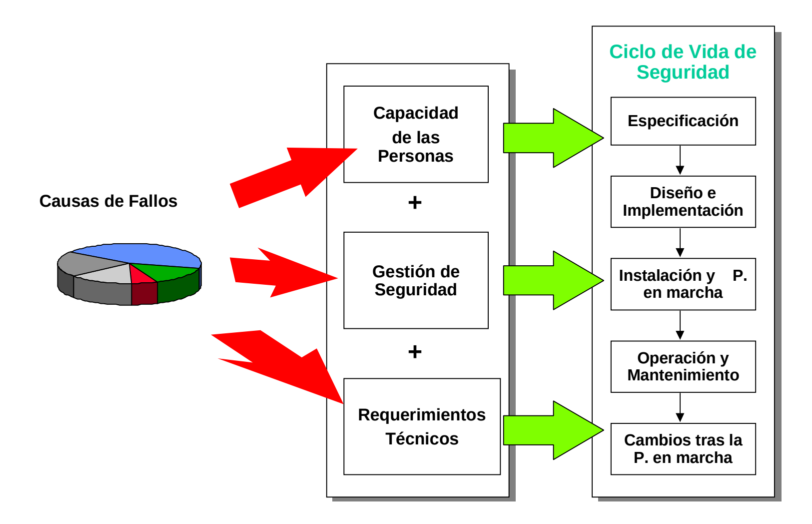


Figura 2-5. Estrategias para la seguridad funcional

Capacidad de las personas: formación adecuada, buenos conocimientos y experiencia.

Gestión de Seguridad: la política de seguridad debe fijarse en un plan de seguridad que debe realizarse para cada proyecto.

Requerimientos técnicos: evaluación de riesgos, nivel de seguridad requerido (SIL), requerimientos del hardware y del software, documentación.

Estos requerimientos deben tenerse en cuenta en cada una de las 16 fases del llamado "Ciclo Global de Vida de Seguridad".

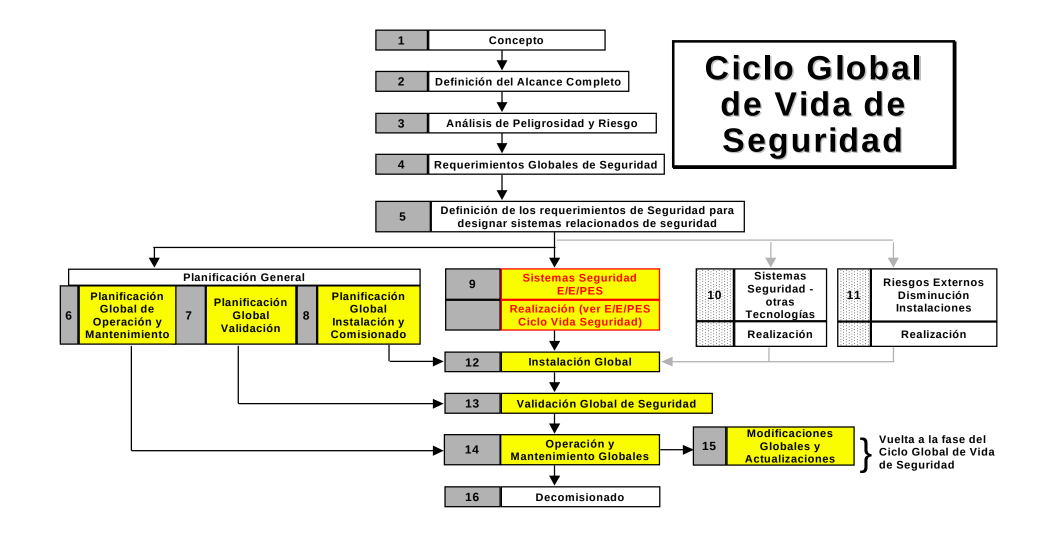


Figura 2-6. Ciclo Global de Vida de Seguridad

El ciclo se inicia con el concepto definición (el escenario), continúa con el análisis de riesgos, realización, puesta en marcha, mantenimiento y finaliza con el fuera de servicio definitivo.

Cada periodo del ciclo de vida incluye:

- Objetivos
- Requerimientos
- Campo de aplicación
- Especificación
- Resultados

La evaluación de la seguridad funcional debe ser realizada en todas las fases, especialmente en los casos de niveles más altos de seguridad, por expertos independientes (empleados, departamentos, organizaciones) con acceso a todo el personal, toda la documentación asociada y todos los equipos.

Dentro de la fase 9 del Ciclo existen dos conceptos claramente diferenciados: el hardware (parte 2 de la IEC-61508) y el software (parte 3).

2.2.2 Diseño de los Sistemas de Seguridades. Consideraciones Generales

Cuando nos enfrentamos ante un Sistema de Seguridades debemos fijar unos criterios básicos de diseño que serán vitales en las fases posteriores:

- ¿Qué Tecnología utilizar? : Relés, Estado Sólido, Microprocesador
- ¿Qué Niveles de Redundancia? ¿Depende de la Tecnología o del Nivel de riesgo?
- Dispositivos de campo: ¿Digitales o Analógicos? ¿Redundantes? ¿Cada cuánto deben ser probados? ¿Depende de la aplicación, tecnología o del nivel de riesgo?
- Pruebas periódicas: ¿Cada cuánto? ¿Depende de la tecnología, del nivel de redundancia o del nivel de riesgo?
- ¿Tipos de fallos del Sistema de Seguridad?
- Normativa: ¿Cuál aplicar?

En cualquier proceso existen muchos riesgos que pueden causar un accidente.

En la Figura 2-7 se muestran todas las posibles causas de un fallo.



Figura 2-7. Riesgos principales

2.2.3 Sistema de Control versus Sistema de Seguridad

Es algo reconocido por todos los expertos en seguridad y recomendado por todas las Normas que ambos Sistemas deben ser independientes. A pesar de todo todavía hoy encontramos técnicos o responsables de planta que no ven o no quieren ver la diferencia entre ambos sistemas y ponen intereses económicos o de otro tipo por encima de la seguridad de la planta.

Es obvio que el utilizar el mismo sistema para ambas funciones (control y seguridad) tiene ventajas (por ejemplo costo y mantenimiento) pero también es evidente que ello tiene muchos riesgos que esperamos aclarar en este capítulo.

Supongamos que el mismo Sistema de Control realiza también las funciones de protección y seguridad y que se produce una demanda de seguridad desde el proceso o caldera, por ejemplo, una repentina subida de presión dentro del hogar. El Sistema de Control debe actuar inmediatamente disparando la caldera, lo que conlleva, por ejemplo, el cierre de todas las válvulas de corte de combustible (SOV=Shut-off Valve).

¿Qué pasa si se produce un fallo en el Sistema de Control? Un fallo de este tipo no debe nunca impedir que la caldera alcance un estado seguro.

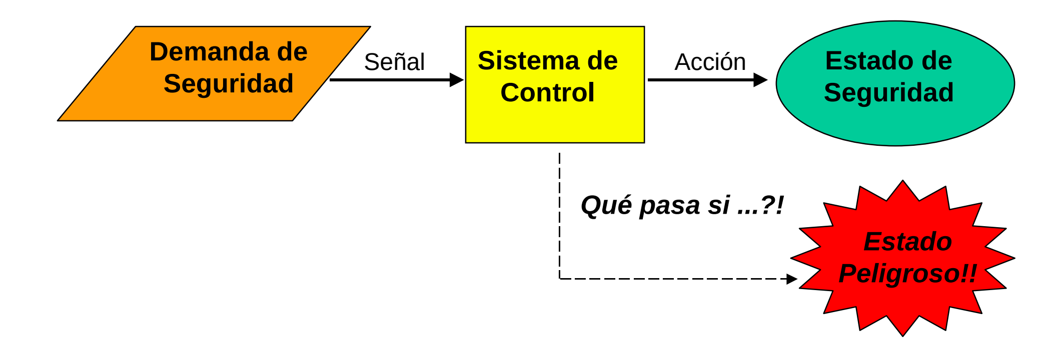


Figura 2-8. Demanda de seguridad

En la Figura 2-8 se muestra un claro y sencillo ejemplo de fallo peligroso.

Si durante la operación de la caldera se había producido un cortocircuito en una salida digital, ni el sistema ni el operador se habían enterado.

Aunque la CPU ordene el cierre de la válvula (desenergización) ésta no se producirá si el transistor de salida está cortocircuitado.

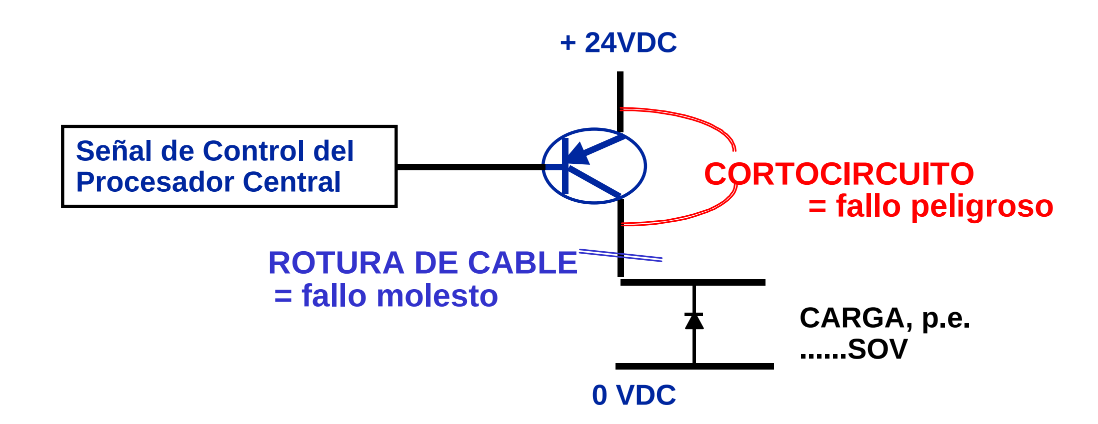


Figura 2-9. Fallo Activo y Pasivo

Ahora supongamos que existe un Sistema de Seguridades separado e independiente.

El Sistema de Seguridades también podría fallar y por ello debe cumplir con ciertos criterios de diseño que lo diferencia enormemente del Sistema de Control.

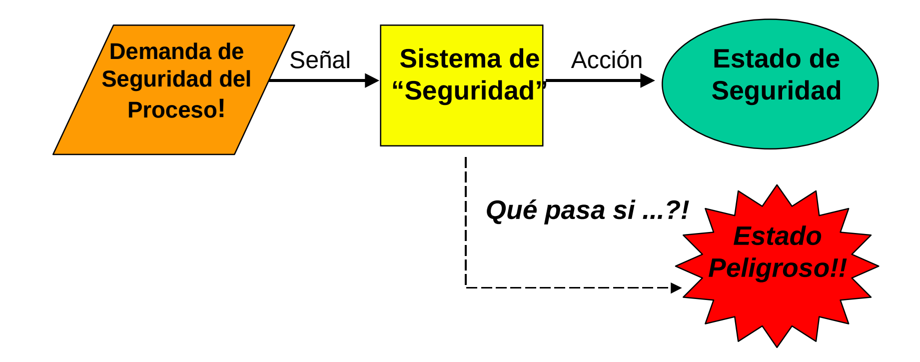


Figura 2-10. Demanda de seguridad

El fallo a posición Segura es esencial. Deben minimizarse los "disparos sin motivo" o "fallos molestos".

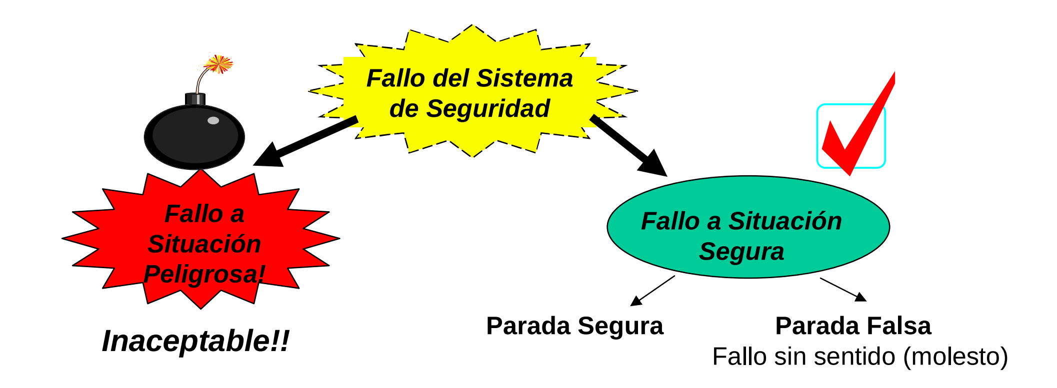


Figura 2-11. Tipos de fallos

Los tipos de fallos del Sistema de Seguridades o SIS (Safety Instrumented System, según la IEC-61508) son:

- Fallo peligroso no detectado: es el peor, se evita con las pruebas periódicas o mejorando los autodiagnósticos

- Fallo peligroso detectado: debe actuarse rápidamente

- Modo degradado por fallo parcial del sistema redundante: es el mejor, la redundancia aumenta el costo de inversión pero reduce el costo total del ciclo de vida

- Disparo falso: debe mejorarse el MTBF del sistema, puede inducir al abuso de los bypasses

La IEC-61508 realiza muchas consideraciones en relación a los fallos del SIS.

Por ejemplo, clasifica los componentes del E/E/PES en 2 grupos:

- Componentes Tipo A

  - Los modos de fallo de todos los componentes están bien definidos y
  - los componentes pueden ser totalmente probados y
  - existe un buen histórico de datos de fallos (100.000 horas de operación en 2 años en 10 sistemas en diferentes aplicaciones).

  Ejemplo: resistencias, relés.

- Componentes Tipo B

  - Los modos de fallo no están bien definidos ó
  - no todos los componentes pueden ser totalmente probados ó
  - no existe un buen histórico de fallos.

  Ejemplo: microprocesadores.

A partir de esta clasificación y considerando el porcentaje de diagnósticos del equipo se establecen los niveles SIL que pueden alcanzarse.

La mayoría de los usuarios han tenido afortunadamente pocas experiencias de fallos en los PLC´s. Los típicos fallos del "watchdog" de la CPU o de una salida digital que no se energiza son conocidos por todos, pero muy pocos conocen a fondo la cantidad de posibles fallos que puede tener un PLC, muchos de ellos semi-ocultos y a veces difíciles de reconocer como fallos claros.

A título de ejemplo diremos que según la IEC-61508 ningún sistema basado en microprocesador puede tener un nivel superior a SIL3 aunque el porcentaje de autodiagnósticos sea del 99%.

Las diferencias principales entre el Sistema de Control y de Seguridades se muestran en el siguiente resumen:

SISTEMA DE CONTROL	***SISTEMA DE SEGURIDAD***
Neumáticos ⇒ DCS/PLC	Relés ⇒ Estado sólido ⇒ PLC's
Activo/Dinámico	Pasivo/Estático
La mayoría de los fallos son detectados	Muchos Fallos no son detectados
Los autodiagnósticos no son necesarios	Los autodiagnósticos son indispensables
Debe permitir los cambios frecuentes	Los cambios deben minimizarse

Los Sistemas de Control son activos y dinámicos, de ahí que la mayoría de los fallos se autodetectan por sí solos. Los Sistemas de Seguridades son pasivos y estáticos por lo que muchos fallos permanecen ocultos. Necesitan ser probados manualmente o incorporar autodiagnósticos, algo que los PLC´s de propósito general apenas incorporan.

Combinar ambas funciones, control y seguridad, en un sólo sistema tiene ventajas: alimentación única, simplifica el mantenimiento y almacenaje de repuestos, facilita la formación del personal técnico y disminuye el costo. Sin embargo casi todas las Normas, Estándares y recomendaciones de los especialistas desaconsejan insistentemente esta combinación.

Si alguien decidiera ir contra estas recomendaciones debiera tener poderosas y documentadas razones para hacerlo. ¿Cómo se podría justificar en caso de accidente ante un jurado una decisión de este tipo?

Ambos Sistemas deben estar física y funcionalmente separados incluyendo los instrumentos y actuadores.



Figura 2-12. Niveles de Control

Los fallos por causas comunes deben evitarse (hardware, software, vibraciones, calor, errores de diseño, errores de mantenimiento, etc.).

2.2.4 Selección de la TECNOLOGIA

¿Neumática, Relés, Estado Sólido, PLC's?

Cada una tiene ventajas e inconvenientes.

Depende de muchos factores: presupuesto, tamaño, nivel de riesgo, flexibilidad, mantenimiento, requerimientos de interfase y comunicaciones, seguridad, etc.

Los sistemas neumáticos pueden ser más convenientes para pequeñas aplicaciones donde interese la simplicidad, seguridad intrínseca y la ausencia de tensiones eléctricas.

Los relés son simples, son relativamente baratos, inmunes a la mayoría de ruidos electromagnéticos y pueden utilizarse para muy diversos rangos de tensiones. No incorporan generalmente ningún tipo de interfase o comunicación. Los cambios

en la lógica pueden ser complejos. En general, los sistemas de relés se utilizan para aplicaciones relativamente pequeñas.

Los sistemas de estado sólido no utilizan software. Muchos de ellos fueron diseñados específicamente para aplicaciones de seguridad e incluyen posibilidades de prueba, by-passes y comunicaciones. Los cambios en la lógica pueden ser complejos. Estos sistemas pierden adeptos cada día debido a su limitada flexibilidad, alto coste y a la aceptación generalizada de los sistemas basados en software.

Los sistemas basados en PLC´s ofrecen muchas ventajas:

Bajo coste, facilidad de realizar cambios, capacidad de comunicación y de interfases, gráficos para el operador, autodocumentación, etc.... y ¿autodiagnósticos?

La mayoría de PLC's no han sido diseñados con la suficiente capacidad de autodiagnóstico y no se recomiendan para aplicaciones de seguridad SIL2 o SIL3
La ausencia de autodiagnósticos es el punto débil de la mayoría de PLC's en aplicaciones de seguridad.

¿Cómo conseguir Seguridad + Disponibilidad al mismo tiempo?

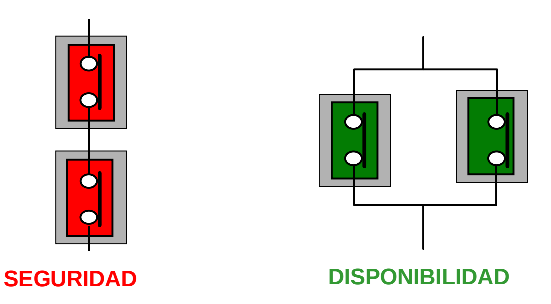


Figura 2-13. Seguridad / Disponibilidad

En los años 70 se intentó elevar el nivel de seguridad utilizando salidas en serie de PLC's de propósito general.

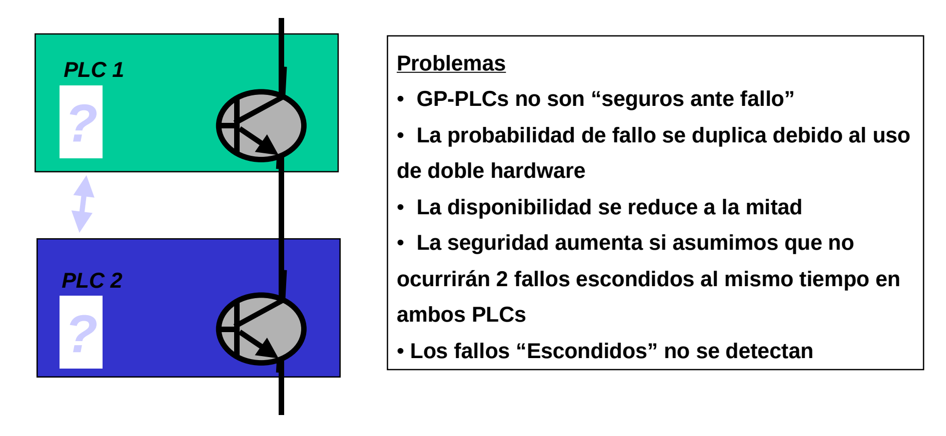


Figura 2-14. PLC's en serie

En los años 80 se intentó aumentar el grado de disponibilidad utilizando salidas en paralelo de PLC's de propósito general.

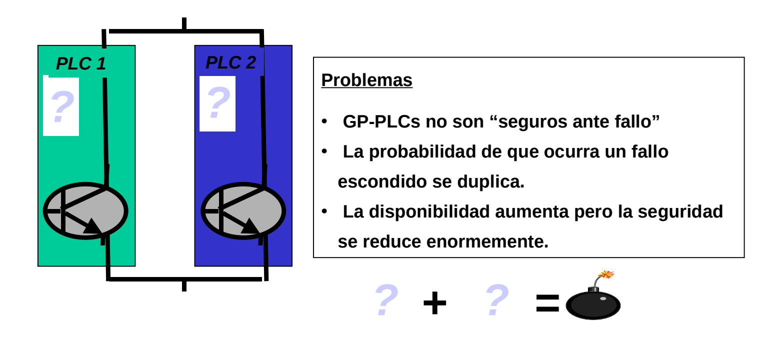


Figura 2-15. PLC's en paralelo

Posteriormente, a mediados de los 80, apareció el principio de voto mayoritario con lógica 2 de 3.

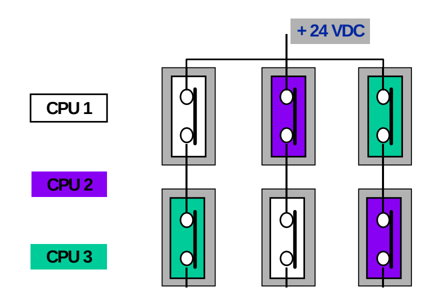


Figura 2-16. Lógica 2 de 3

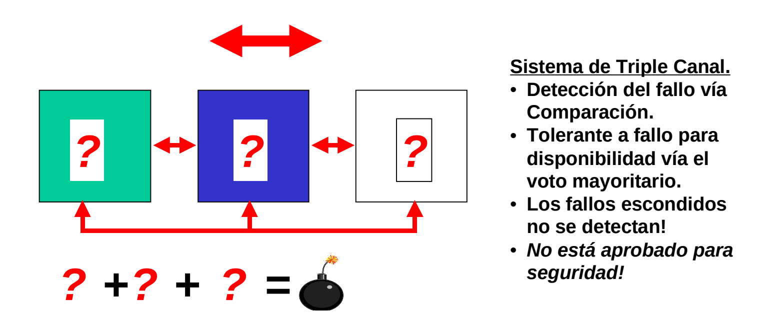


Figura 2-17. Lógica 2 de 3

Otra arquitectura también muy utilizada e incluso recogida en algunos Estándares es la mostrada en la Figura 2-18.

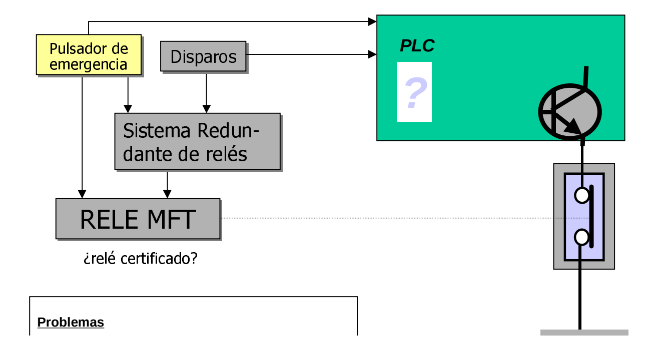


Figura 2-18. Sistema Redundante de Relés

¿ Qué mejoras introduce el PLC de seguridad?

Analicemos por ejemplo, paso a paso, la electrónica utilizada en una salida digital. Partimos del circuito más simple, con un solo transistor de salida:

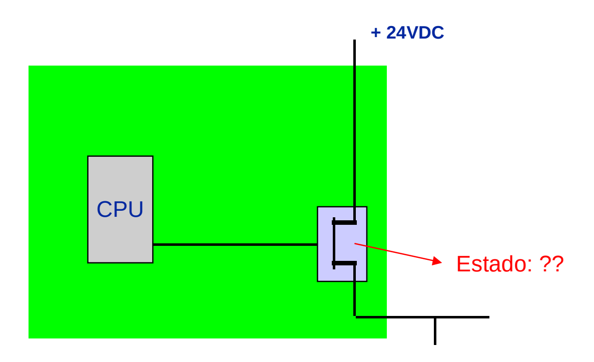


Figura 2-19. Salida digital

Si se cortocircuita el transistor estaremos ante un fallo peligroso no detectado (FTD=Fail To Danger).

Para al menos detectarlo, introducimos una realimentación de la salida y una rutina de diagnóstico de micropulsos de prueba:

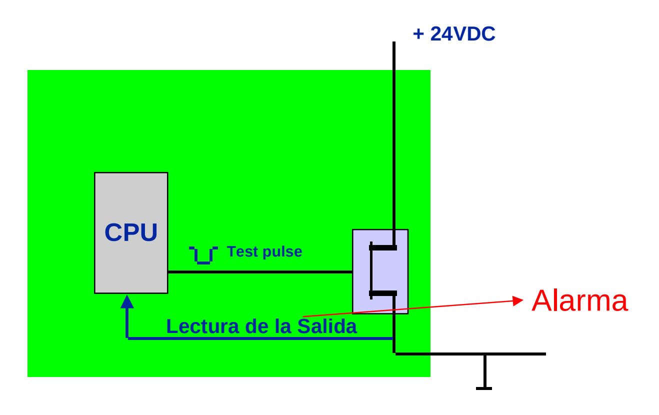


Figura 2-20. Salida digital

Para actuar sobre la salida en caso de fallo utilizamos un segundo transistor en serie.

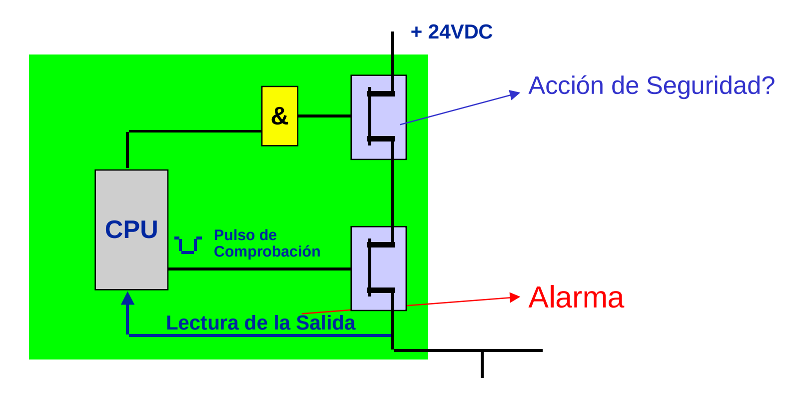


Figura 2-21. Salida digital

Realimentamos también el segundo transistor y además lo enclavamos con el circuito watchdog:

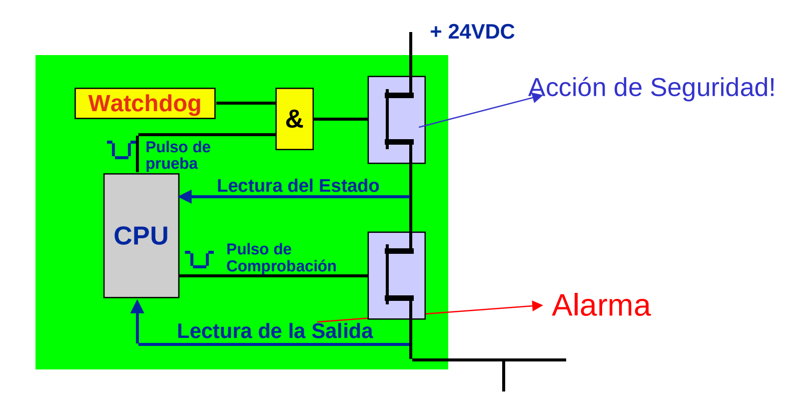


Figura 2-22. Salida digital

Hasta ahora hemos conseguido un circuito de salida seguro ("fail-safe"), tolerante a fallo para Seguridad pero no para Disponibilidad.

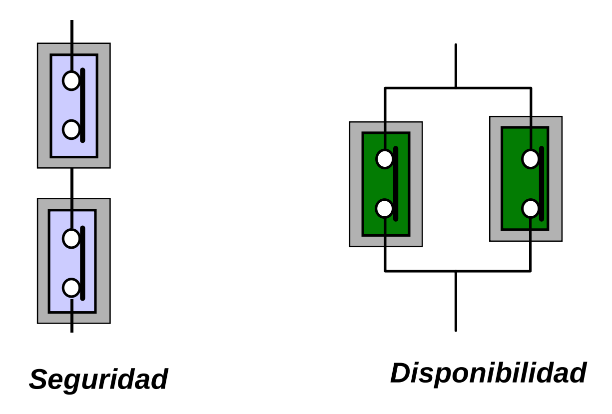


Figura 2-23. Seguridad / Disponibilidad

Si redundamos el circuito tendremos las dos cosas:

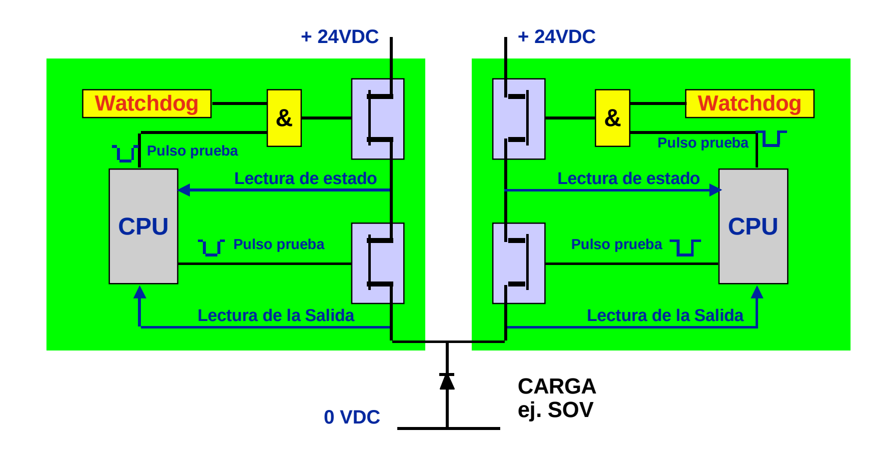


Figura 2-24. Salida digital redundante

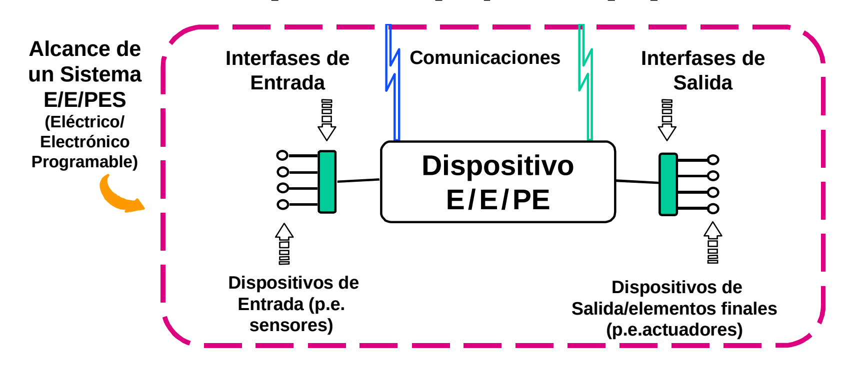
Existen muchas diferencias entre un PLC estándar, de propósito general, y un PLC de seguridad. A continuación se indican las más importantes:

PLC fail-safe	***PLC estándar***
Cumple estrictamente las Normas de diseño de Sistemas de Seguridad tales como la IEC61508, NFPA, FM	No cumple ninguna Norma de Seguridad
Certificado por organismos competentes de prestigio como TÜV	
Incorporan rutinas de autodiagnóstico de todo el hardware y software que detectan cualquier fallo interno peligroso (>99%)	La ausencia de autodiagnósticos requiere una labor extra de pruebas frecuentes de mantenimiento que algunas veces exige la parada del sistema
El fallo a situación segura está garantizado si falla cualquier componente interno	Los fallos peligrosos "escondidos" no se detectan por lo que se pueden producir situaciones peligrosas. No son seguros ante fallo.
Las modificaciones se autodocumentan automáticamente por lo que se minimizan los errores	Ejemplos de fallos peligrosos no detectados: cortocircuito de la salida, pérdida o corrupción de memoria o de transferencia de datos en el bus interno, bloqueo de I/O a estado "1" o "0", fallos en la CPU, etc.

2.2.5 Dispositivos de campo

El nuevo Estándar IEC-61508 introduce el concepto de SIS (Safety Instrumented System). El SIS no es solamente el PLC, sino también los dispositivos de campo, la corriente eléctrica, etc.

Si atendiéramos a la probabilidad de fallo de cada parte del SIS deberíamos cuidar mucho más el diseño de la parte de campo que la del propio PLC.



Nota 1 : El Dispositivo E/E/PE se muestra localizado en el centro, pero puede existir en distintas localizaciones dentro del sistema E/E/PES

Nota 2 : También las denominadas “utilities” (p.e. corriente eléctrica, aire, sistemas hidráulicos) están incluidos en el sistema E/E/PES

Figura 2-25. Concepto SIS

La Figura 2-26 se refiere solamente a los fallos del hardware sin tener en cuenta otros factores externos como el mantenimiento incorrecto o insuficiente, errores de calibración y la formación.

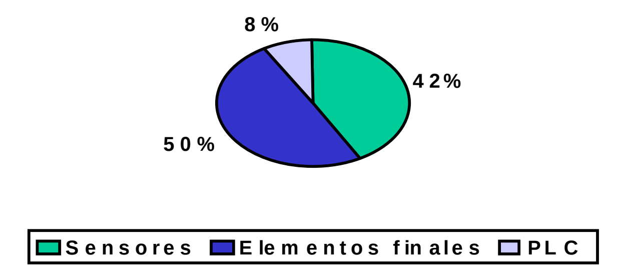


Figura 2-26. Fallos hardware

También con los dispositivos de campo se deben hacer una serie de consideraciones:

- Fallos peligrosos (FTD) y fallos molestos (FTN)
- Selección correcta para cada aplicación
- Tendencia al uso de transmisores “smart” (más diagnósticos)

Redundancia:

- La probabilidad de fallo simultáneo en dos sensores es remota, excepto en los fallos por causas comunes (temperatura, vibraciones, montaje, alimentaciones, cableado, errores humanos)
- La influencia de las causas comunes internas disminuye cuanto mayor es el nivel de redundancia.
- Efectiva contra fallos aleatorios pero no contra errores de diseño o sistemáticos.
- Lógica sensores: 1oo1,1oo1D,1oo2,1oo2D,2oo3.
- Lógica elementos finales: 1oo1,1oo2,2oo2.

2.2.5.1 Requerimientos de diseño:

Los siguientes puntos deben tenerse en cuenta en el diseño de los dispositivos de campo de cualquier sistema de seguridades:

- Independientes de los del Sistema de Control.

- Fail-safe: la pérdida de energía provoca el disparo.

- Sensores: cableados directamente al PLC, transmisores smart, alarmas de discrepancia si hay redundancia, rangos apropiados.

- Elementos finales: posición en caso de fallo de aire o energía eléctrica, finales de carrera, rapidez de respuesta, ambiente agresivo, etc.).

- Cableado: inducciones, tierras, cajas y multicables separados, cables sin comunes, fusibles.

2.2.6 Hardware del Sistema

Los siguientes puntos deben tenerse en cuenta en el diseño del hardware de cualquier sistema de seguridades:

- Desenergizar para disparar.

- Rutinas de diagnósticos por el carácter pasivo del SIS.

- Minimizar los fallos por causas comunes.

- Protección contra agentes externos: tª, humedad, ruido eléctrico, vibraciones, etc.

- Alimentación eléctrica: limpia, protegida y estabilizada.

- Tierras adecuadas.

- Relés: para máxima y mínima carga.

- Bypasses con alarma individual.

- Procedimiento completo de pruebas.

2.2.7 Software del Sistema

Los siguientes puntos deben tenerse en cuenta en el diseño del software de cualquier sistema de seguridades:

- Estructurado y con método.

- Comentado con la máxima claridad.

- La funcionalidad debe probarse a fondo mediante un procedimiento y el uso de simuladores.

- Prevenir los accesos no autorizados.

- No realizar cambios “on-line”.

- Cualquier cambio en planta debe probarse a fondo y documentarse.

2.2.8 Mantenimiento del Sistema

Los siguientes puntos deben tenerse en cuenta en el mantenimiento de cualquier sistema de seguridades:

- Por personal bien entrenado.

- Pruebas periódicas para verificar la integridad del SIS incluyendo el PLC y campo.

- La capacidad de autodiagnósticos del PLC influye mucho sobre la periodicidad.

- Cualquier cambio debe probarse a fondo y documentarse.

2.2.9 Requerimientos de diseño de la NFPA

El Estándar NFPA es posiblemente el más utilizado y aceptado en todo el mundo. Se trata de una Norma de carácter general donde se dan una serie de recomendaciones tanto desde el punto de vista del proceso como del sistema de seguridades utilizado. Muchas de estas recomendaciones son de obligado cumplimiento, otras son solo recomendables y otras se dejan en manos del fabricante o diseñador. Algunas veces las recomendaciones son interpretables de formas distintas según el punto de vista y los intereses del que lo hace.

Desde el punto de vista del "Sistema lógico" existen algunas recomendaciones que se indican en el apartado 2.3.1

2.2.10 Conclusiones prácticas

Sacar conclusiones de todo lo anterior es realmente difícil. Sin embargo lo hemos intentado por medio de la Figura 2-27, en la parte relativa al diseño de PLC (hardware + software).

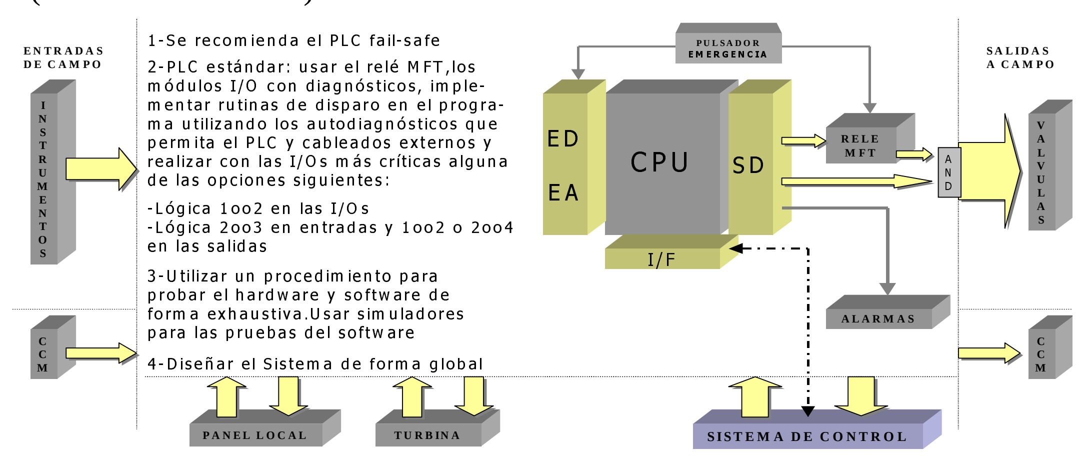


Figura 2-27. Sistema BPS-BMS

2.2.11 Detectores de llama

Dentro de los dispositivos de campo, los detectores de llama son seguramente unos de los más importantes en un Sistema de Seguridades de Caldera. Por ello y por el desconocimiento que existe en muchos técnicos hemos querido hablar algo de ellos en este curso.

En la parte superior de la Figura 2-28 se muestran las curvas de Foto-sensibilidad vs. longitud de onda, de los sensores más habitualmente utilizados.

La curva S1 es la del sensor del detector ultravioleta (UV) y la curva S3 la del sensor de sulfito de plomo del detector de infrarrojos (IR).

En la parte central inferior de las gráficas (de 400 a 800nm.) se muestra la zona de radiación visible por el ojo humano.

En la parte inferior de la Figura 2-28 se muestran las curvas de Energía-emitida vs. longitud de onda, de las llamas de los combustibles más habituales.

La F1 corresponde a la llama de fuel-oil. Se observa que emite radiación UV y mucha IR.

La F2 corresponde a la llama de carbón pulverizado. Se observa que emite poca radiación UV y mucha IR.

La F3 corresponde a la llama de gas. Se observa que emite mucha radiación UV y mucha IR.

La F4 corresponde a la radiación emitida por la pared caliente de la caldera. Se observa que sólo emite radiación IR.

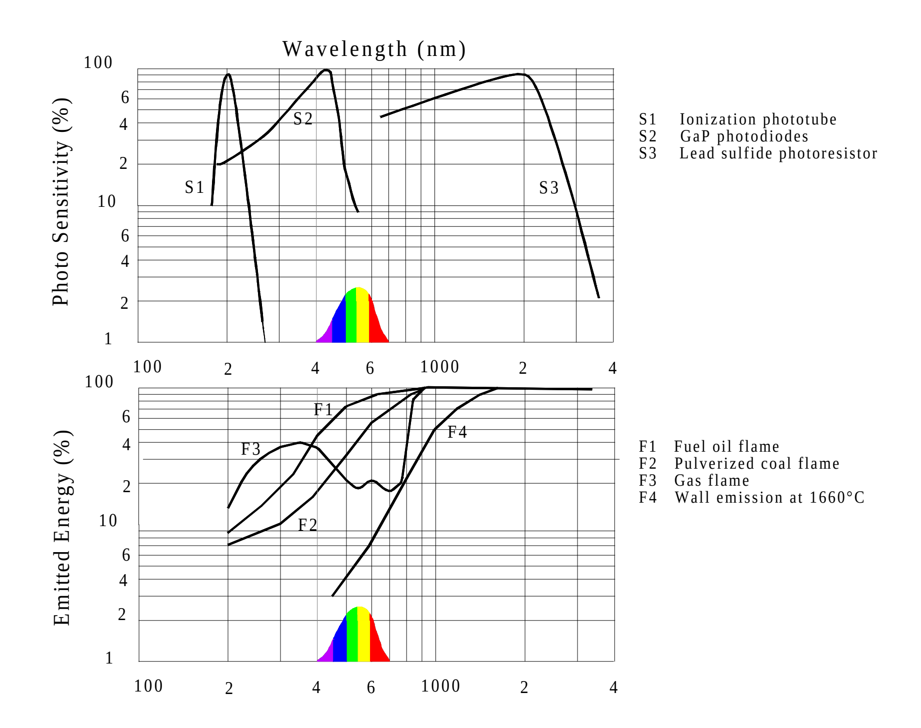


Figura 2-28. Curvas detectores

De la observación de estas curvas se pueden sacar algunas conclusiones.

En primer lugar parece claro que para el gas debemos utilizar el detector UV y para el carbón pulverizado el detector IR/Flicker. La llama de gas emite también mucha radiación IR pero de una frecuencia similar a la de la pared caliente de la caldera.

El efecto Flicker es el de pulsación de la llama. La frecuencia de pulsación es distinta según sea el combustible, la zona de la llama y las condiciones de la combustión. Por ello es muy importante que el amplificador de llama incorpore filtros de frecuencia que puedan discriminar unas frecuencias de otras.

En segundo lugar debemos tener cuidado con las radiaciones de baja frecuencia de la pared caliente pues pueden producir señales falsas de llama si no las filtramos. Cuando utilizamos la zona IR debemos, casi siempre, evitar las bajas frecuencias.

En la Figura 2-29 se muestra un resumen muy general de las ventajas y desventajas de cada tipo de detector.

Detector UV

•Recomendado para gas y gas-oil y,según el caso,para fuel-oil

•Ventajas: el fondo de la caldera no emite radiación UV, el principio de medida es sencillo, es idóneo para detectar y discriminar gas

•Desventajas: no es válido para combustibles sólidos , no siempre las características de la lámpara son adecuadas y constantes

•La función self-checking es necesaria

Detector IR/Flicker

•Recomendado para fuel-oil y carbón y,según el caso,para gas-oil

•Ventajas: el efecto flicker permite discriminar ajustando la frecuencia, la fiabilidad del sensor de sulfito de plomo es alta

•Flicker: la frecuencia IR emitida aumenta cuanto mejor es el combustible, las frecuencias más fiables son las altas. Para discriminar correctamente el amplificador debe tener filtros de frecuencia lo cual lo encarece

•Desventajas: el fondo de la caldera emite radiación IR de baja frecuencia

•La función self-checking es necesaria

Figura 2-29. Detectores UV/IR

En la Figura 2-30 se muestran algunas curvas típicas de llamas de fuel-oil y carbón pulverizado.

Obsérvese que puede ocurrir (ver gráfico inferior derecho) que en algunas frecuencias (las bajas) las intensidades con el quemador apagado sean superiores a las del quemador encendido.

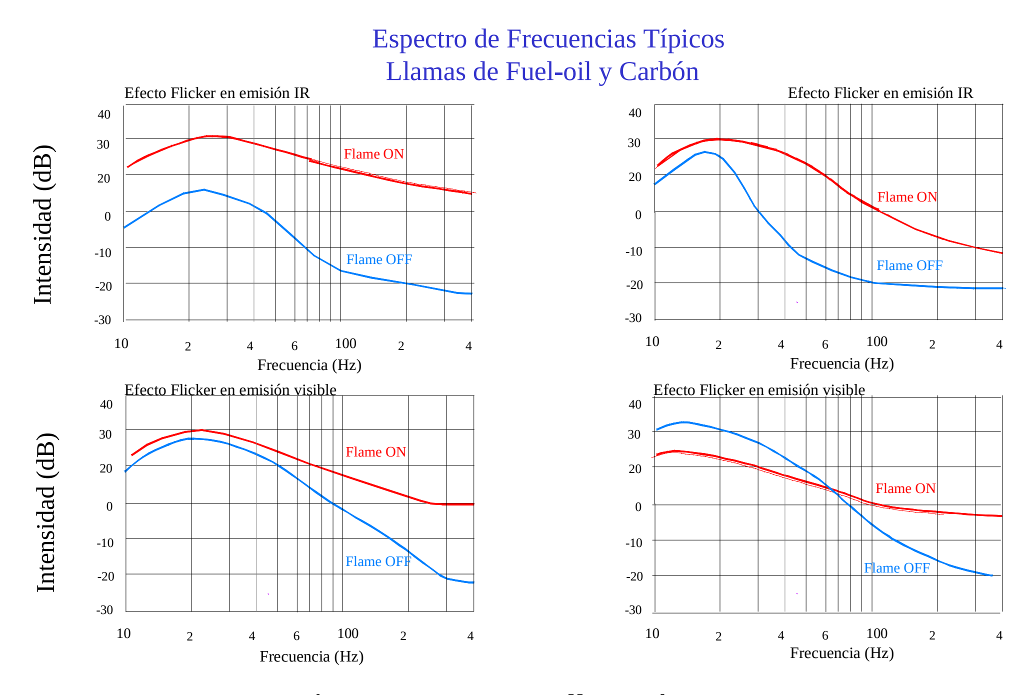


Figura 2-30. Curvas llama típicas

2.2.12 Terminología de seguridad

MTTF	Mean Time To Failure
PFD	Probability of Failure on Demand
SIS	Safety Instrumented System
SIL	Safety Integrity Level
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FTA	Fault Tree Analysis
HAZOPS	Hazard and Operational Analysis
MTTR	Mean Time to Repair
MTBF	Mean Time Between Failures
FIT	Failures per billion (10^9) hours
RRF	Risk Reduction Factor
MTTFD	Mean Time To Fail Dangerously
PFS	Probability of Failing Safely
MTTFS	Mean Time To Fail Safely
FMEDA	Failure Modes, Effects and Diagnostic Analysis
FTD	Fail To Danger
FTN	Fail To Nuisance

2.3 BMS para calderas industriales

2.3.1 Requisitos de diseño

Los siguientes requisitos de diseño están extraídos de los requerimientos exigidos por la NFPA 8502.

El BMS se diseñará de forma que un fallo individual en el sistema no impida la ejecución de un disparo. Se deberán generar las alarmas necesarias para indicar mal funcionamiento del equipo, condiciones de riesgo o mala operación. El primer objetivo es el de alarmar condiciones que supongan una amenaza de peligros próximos o inmediatos.

El diseñador del sistema deberá evaluar como mínimo los siguientes modos de fallos de los componentes:

a) Interrupciones, excursiones, restablecimiento, caídas, transitorios y pérdidas parciales de tensión.

b) Corrupción y pérdida de memoria.

c) Corrupción y pérdida de transferencia de información.

d) Fallo a energizado o desenergizado de las entradas y salidas.

e) Señales no legibles o no leídas.

f) Fallo en la detección de errores.

g) Fallos de procesador.

h) Fallos en las bobinas de los relés.

i) Fallos a abrir o cerrar en los contactos de los relés.

j) Fallos en los temporizadores.

Se deberán incluir diagnósticos para vigilar el funcionamiento del procesador.

Los fallos del sistema lógico no impedirán la intervención propia del operador.

La lógica estará protegida contra cambios no autorizados.

La lógica no se cambiará con el equipo asociado en operación.

El tiempo de respuesta del sistema será suficientemente corto como para prevenir efectos negativos sobre la aplicación.

Deberá tener una protección adecuada al ruido para prevenir falsas maniobras.

El operador siempre estará provisto de un pulsador manual dedicado que actúe sobre el relé MFT independiente y directamente.

El sistema BMS no será combinado con ningún otro sistema lógico.

El BMS incluirá como mínimo, aunque no estará limitado, las siguientes funciones de seguridad: enclavamientos y temporizado de la purga, disparos de seguridad obligatorios, tiempo de encendidos y vigilancia de la llama.

El BMS estará limitado a una sola caldera.

El BMS estará provisto de lógica independiente, entradas y salidas independientes, fuentes de alimentación independientes, y estará física y funcionalmente separado de otros sistemas lógicos.

Se permite el uso de comunicaciones software con otros sistemas. Las señales que inicien disparos deberán ser cableadas.

Las secuencias y equipos que causen un disparo, una vez iniciado éste, requerirán la acción del operador para restablecer la operación del equipo disparado. No se permitirá que ninguna secuencia lógica o equipo cierre momentáneamente y reabra inadvertidamente las válvulas de combustible.

2.3.2 Requisitos funcionales

La función del sistema de seguridades de caldera y manejo de quemadores es la de vigilar la caldera y poner o quitar de servicio de una forma segura los quemadores.

De acuerdo con todas las señales procedentes de la instrumentación de campo (transmisores de presión, temperatura, nivel, finales de carrera, etc.) y, si es el caso, de las procedentes de otros sistemas o equipos auxiliares, el BMS se encargará de ejecutar las acciones necesarias (cierre de válvulas de combustible, etc.) para evitar sobrepasar los límites de funcionamiento considerados aceptables para la caldera o el proceso, llevando a la caldera a una situación de seguridad desde la cual se podrá reiniciar su puesta en servicio.

Además de la vigilancia continua del estado general de la caldera, el BMS se encargará de ejecutar, de una forma segura, todas las secuencias de encendido y apagado de los quemadores e ignitores.

De forma general, se podrían distinguir las siguientes secuencias:

- **Disparos de Caldera**. Cualquier situación de riesgo para la caldera o el proceso provocará un disparo de la misma. Dicho disparo provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustible, así como la desenergización del relé MFT.

– **Barrido o Purga de Caldera**. Después de cualquier disparo de caldera se debe realizar un barrido del hogar y de todos sus conductos asociados, con el objetivo de evitar que una posible atmósfera rica en combustible, debida a pequeñas fugas o a inquemados, pueda causar una explosión en el caso de un encendido.

– **Rearme de Caldera.** Una vez que el barrido ha sido finalizado y no hay ninguna condición de disparo, se ha de rearmar el relé MFT. Esta acción produce el *reset* de todas las memorias de disparo, tanto a nivel software (PLC) como hardware (relé MFT), lo que permitirá el encendido del quemador. El relé MFT es un relé de seguridad que es manejado por el PLC además de ser desenergizado directamente por los pulsadores de disparo de emergencia. La tensión a todas las válvulas de corte combustible se establece a través de sus contactos de forma que si el relé MFT está desenergizado no es posible la apertura de dichas válvulas.

– **Encendido y apagado de los quemadores e ignitores**. Estas secuencias se encargarán de la puesta en servicio de los quemadores, asegurando que todos los permisivos necesarios para ello se van cumpliendo adecuadamente. Asimismo, se encargará de la vigilancia permanente del estado de los quemadores, de forma que provocará el disparo de los mismos ante una anomalía en las señales de proceso (pérdida de llama, alta/baja presión de combustible etc.), cortando inmediatamente la aportación de combustible al hogar.

2.3.3 Barrido de caldera

Después de cada disparo de caldera se debe utilizar el barrido con el VTF para remover del hogar cualquier resto de combustible gaseoso o suspendido y reemplazarlo por aire.

2.3.3.1 Permisivos

El operador comprobará que se satisfacen todos los permisivos de arranque del VTF y lo arrancará. Para poder realizar el barrido de caldera se deberán cumplir las siguientes condiciones:

a) Caldera disparada.

b) Caudal aire combustión no bajo/bajo.

c) Todas las válvulas de corte de combustible cerradas.

d) VTF en marcha.

e) Presión hogar no alta/alta.

f) No disparo de emergencia.

g) Alabes VTF no forzados a posición completamente abierta (tiro natural).

h) No bloqueo de álabes del VTF. Situación que se produce ante un disparo de caldera debido a un muy bajo caudal de aire de combustión o a una muy baja relación combustible-aire.

i) No llama detectada.

En este momento la indicación de iniciar barrido caldera se iluminará hasta que el operador presione el pulsador de inicio de barrido, iniciándose entonces la secuencia de barrido.

2.3.3.2 Secuencia automática

Una vez presionado el pulsador de inicio del barrido, se dará orden de situar los álabes del VTF en posición de barrido.

Para que la secuencia de barrido se lleve a cabo con éxito, se deben cumplir las siguientes condiciones:

a) Permisos de barrido satisfechos.
b) Caudal de aire >= 25 % de plena carga.
c) Registros de aire de los quemadores abiertos.

Si estas condiciones se cumplen, se iluminará la indicación de barrido de caldera en progreso durante un período de 300 seg. Si durante la secuencia automática se pierde algún permisivo, será necesario repetir la secuencia de barrido.

2.3.3.3 Rearme

Una vez finalizado el barrido de caldera y si no existe ninguna condición de disparo (ver 2.3.4) se iluminará la indicación de rearmar caldera y el operador deberá accionar el pulsador correspondiente con el objeto de rearmar el relé MFT y la lógica de disparo de caldera. Una vez rearmada la caldera la indicación de caldera disparada desaparece, quedando la caldera en disposición de encendido.

2.3.4 Disparos de caldera

2.3.4.1 General

Cualquier disparo de caldera provocará el cierre de todas las válvulas de corte de combustible así como la desenergización del relé MFT.

2.3.4.2 Disparos

Cualquiera de las siguientes causas provocará un disparo de caldera:

a) Relación aire/combustible muy bajo.

b) Nivel del calderín muy bajo.

c) Presión del vapor del calderín muy alta.

d) Presión del hogar muy alta.

e) Presión del aire de instrumentación muy baja.

f) Fallo de alimentación del sistema de control.

g) VTF no en marcha.

h) Caudal aire combustión muy bajo.

i) Disparo de emergencia.

j) Pérdida de todas las llamas.

k) Ultima válvula de combustible cerrada.

2.3.5 Ignitor

2.3.5.1 General

El ignitor se pondrá en servicio cuando sea requerido para el encendido del quemador al actuar sobre el pulsador de encendido del quemador, o cuando sea requerido para la purga del combustible líquido.

2.3.5.2 Permisivos de encendido

El ignitor podrá ser puesto en servicio si las siguientes condiciones están presentes:

a) No existen condiciones de disparo de emergencia del ignitor (ver 2.3.5.4).

b) Transcurrido el tiempo entre encendidos.

c) Todas las válvulas de combustible cerradas y no hay llama en caldera, o algún quemador está en servicio.

d) No hay llama de ignitor detectada o algún quemador está en servicio.

e) No existen condiciones de disparo de caldera.

En este momento el ignitor quedará listo para encender desde la lógica de encendido del quemador.

2.3.5.3 Secuencia automática de encendido

La secuencia de encendido del ignitor será como sigue:

a) Los transformadores de ignición se energizarán durante 10 seg.

b) Las válvulas de corte del ignitor se energizarán durante 10 seg.

c) Si tras el fin de estos 10 seg. se recibe la señal de llama ignitor detectada, se activará la indicación de ignitor en servicio manteniéndose abiertas sus válvulas y retirando el transformador.

2.3.5.4 Apagado del ignitor

El ignitor se apagará cuando éste no sea requerido por el quemador ó cuando ocurra cualquiera de las siguientes condiciones de disparo de emergencia del ignitor:

a) Disparo de la caldera.

b) Fallo de llama del ignitor.

2.3.6 Quemador de gas

2.3.6.1 Permisivos de encendido

El operador podrá encender el quemador si los siguientes permisivos de encendido están satisfechos:

a) Llama de quemador no detectada e ignitor listo para encender, o el quemador está en servicio con combustible líquido.

b) No disparo de caldera.

c) Presión de suministro de gas natural no baja.

d) Válvulas de corte del quemador de gas natural cerradas.

e) Condiciones de disparo del quemador de gas natural no presentes (ver 2.3.6.3).

f) Ningún quemador se encuentra en secuencia de encendido.

g) Válvula de control de gas natural en posición de encendido.

En este momento la indicación quemador de gas natural listo se iluminará y el operador podrá encenderlo actuando sobre su correspondiente pulsador.

2.3.6.2 Secuencia automática de encendido

La secuencia automática de encendido del quemador con gas natural será como sigue:

a) El ignitor es puesto en servicio (si el quemador no está en servicio con combustible líquido) según se describe en 2.3.5.3.

b) Se da orden de abrir las válvulas de corte y orden de cerrar la válvula de venteo de dicho quemador.

Si se reciben las señales de válvulas de corte de gas natural no cerradas y llama de quemador detectada, transcurridos 5 seg., se iluminará la indicación de quemador de gas natural en servicio.

c) Se da orden de apagar el ignitor (si está en servicio).

2.3.6.3 Apagado del quemador

El apagado del quemador de gas natural se provocará cuando el operador actúe sobre el correspondiente pulsador de apagado o por cualquiera de las siguientes condiciones de disparo, haciendo que sus válvulas de corte se cierren:

a) Disparo de caldera.

b) Muy baja presión de gas natural (3 seg. después de la apertura de las válvulas de corte de gas natural).

c) Muy alta presión de gas natural.

d) Condición de disparo gas natural (input excedido).

e) Fallo llama quemador gas natural.

f) Fallo de encendido del ignitor al ser requerido por la secuencia del quemador.

g) Fallo de válvulas de corte de gas natural.

2.3.7 Quemador de fuel oil

2.3.7.1 Permisivos de encendido

El operador podrá encender el quemador si los siguientes permisivos de encendido están satisfechos:

a) Llama de quemador no detectada e ignitor listo para encender, o el quemador está en servicio con gas natural.

b) No disparo de caldera.

c) Presión de suministro de vapor de atomización no baja.

d) Presión de suministro de combustible liquido no baja.

e) Válvulas de corte de combustible líquido cerradas.

f) Condiciones de disparo del quemador con combustible líquido no presentes (ver 2.3.7.3).

g) Ningún quemador se encuentra en secuencia de encendido.

h) Válvula de control de combustible líquido en posición de encendido.

En este momento la indicación quemador de combustible líquido listo se iluminará y el operador podrá encenderlo actuando sobre dicho pulsador.

2.3.7.2 Secuencia automática de encendido

La secuencia automática de encendido del quemador con combustible líquido será como sigue:

a) El ignitor es puesto en servicio (si el quemador no está en servicio con gas natural) según se describe en 2.3.5.3.

b) Se da orden de cierre a la válvula de recirculación y de apertura a las válvulas de corte de combustible líquido y del vapor de atomización de dicho quemador.

Si se reciben las señales de válvulas de corte de combustible liquido no cerradas, válvula de atomización abierta y llama de quemador detectada, transcurridos 5 sg., se iluminará la indicación de quemador de combustible líquido en servicio.

c) Se da orden de apagar el ignitor (si está en servicio).

2.3.7.3 Apagado del quemador

El apagado del quemador de combustible líquido se provocará cuando el operador actúe sobre el correspondiente pulsador de apagado o por cualquiera de las siguientes condiciones de disparo, haciendo que sus válvulas de corte se cierren:

a) Disparo de caldera.

b) Muy baja temperatura del combustible líquido.

c) Muy alta temperatura del combustible líquido.

d) Muy baja presión del combustible líquido.

e) Muy alta presión del combustible líquido.

f) Muy baja presión diferencial vapor atomización/ combustible líquido.

g) Condición de disparo combustible líquido (input excedido).

h) Lanza del quemador combustible líquido no acoplada.

i) Fallo de llama de quemador combustible liquido.

j) Fallo de encendido del ignitor al ser requerido por la secuencia del quemador.

k) Fallo de válvulas de corte de combustible líquido.

l) Fallo de válvula de corte de vapor de atomización

2.3.7.4 Purga del combustible líquido

Cuando se produce un apagado o disparo del quemador de combustible líquido y una vez estén cerradas sus correspondientes válvulas de corte, se llevará a cabo una secuencia de purga para limpiar la caña del quemador. La secuencia automática que se genera es la siguiente:

a) Secuencia de encendido del ignitor (sólo si el quemador no tiene gas natural en servicio).

b) Se da orden de abrir la válvula de purga y vapor de atomización, iniciándose una temporización de 60 seg.

c) Pasado este tiempo, la secuencia de purga se considera finalizada y se da orden de cerrar a la válvula de purga y de vapor de atomización y de apagar el ignitor.

El proceso de purga de la caña del combustible líquido puede ser bloqueado por cualquiera de los siguientes motivos:

a) Disparo de caldera.

b) Fallo de válvulas de corte de combustible líquido.

c) Muy baja presión del vapor de atomización.

d) Lanza no acoplada.

e) La válvula de atomización no está abierta.

f) El ignitor no entra o no está en servicio cuando es requerido.

Si la secuencia de purga es bloqueada, el operador puede reiniciarla si todos los permisivos se cumplen a través del pulsador de apagar quemador de combustible líquido.

2.4 BPS-BMS para calderas de recuperación de calor

Los requisitos de diseño y funcionales del sistema de seguridades en una caldera de recuperación son análogos a los comentados para una caldera industrial. Incluso la mayoría de las secuencias descritas para ellas serán válidas en este caso también. Sin embargo, por su particular diseño en cuanto al sistema de aire gases, las secuencias de purga y disparos de calderas se ven modificadas. Por ello, a continuación sólo se explicarán estas secuencias para las distintas configuraciones habituales en estas calderas.

2.4.1 Calderas sin bypass y sin postcombustión

2.4.1.1 Relé MFT

Al no haber quemador no existirá el relé MFT.

2.4.1.2 Purga previa al encendido de la turbina

El BPS enviará a la turbina la señal de “No disparo de combustión en turbina” si:

a) No existen condiciones de disparo (ver 2.4.1.3).

Será el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de la secuencia de purga previa a su encendido.

2.4.1.3 Disparos de caldera/turbina

Las siguientes condiciones provocarán el disparo de la combustión en turbina:

a) Muy bajo nivel de calderines.

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia.

d) Muy alta presión de calderines.

2.4.1.4 Señales intercambiadas entre turbina y caldera

Turbina		**Caldera**
	←-------------------------------------	No disparo de combustión en turbina

2.4.2 Calderas con bypass y sin postcombustión

Nota General: En lo sucesivo se hablará de diverter, entendiéndose como tal cualquier medio de aislamiento turbina-caldera.

2.4.2.1 Relé MFT.

Al no haber quemador no existirá el relé MFT.

2.4.2.2 Purga previa al encendido de la turbina

Se podrá decidir arrancar la instalación en ciclo simple o combinado.

Purga a través de caldera (ciclo combinado)

El operador podrá (si existe permiso de apertura – ver 2.4.2.3) abrir el diverter hasta el 100% y, entonces, el BPS enviará a la turbina la señal "Diverter 100% abierto a caldera".

La turbina comenzará su secuencia de arranque y puesta en servicio a través de la caldera, siendo el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de vigilancia y temporización de la purga previa a su encendido.

Purga a través del bypass (ciclo simple)

El BPS enviará a la turbina la señal “Caldera Aislada” cuando:

a) Confirmación finales de carrera de diverter cerrado a caldera y

b) No hay fallo en el sistema de sello del diverter.

La turbina comenzará su secuencia de arranque y puesta en servicio a través del bypass, siendo el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de vigilancia y temporización de la purga previa a su encendido.

2.4.2.3 Permisos de apertura de diverter

Después de cualquier condición de cierre del diverter o en un arranque inicial, éste se podrá volver a abrir si se cumplen los siguientes permisivos de apertura:

a) Caldera rearmada.

b) Diverter listo.

c) Condiciones de cierre de diverter no presentes

d1) Temperatura de gases de turbina <Tª autoignición-56ºC, o

d2) Purga de caldera satisfecha.

2.4.2.4 Condiciones de cierre del diverter/rearme de caldera

Condiciones de cierre del diverter

Las siguientes condiciones provocarán el cierre del diverter:

a) Muy bajo nivel de calderines.

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia cierre de diverter. Se cableará directamente a la señal de mando del diverter.

d) Muy alta presión de calderines.

Rearme de Caldera

Después de cualquier condición de cierre del diverter, el operador deberá comprobar la causa que lo motivó y, una vez subsanada, deberá actuar sobre el

pulsador de rearmar caldera, como requisito imprescindible para el inicio de la apertura del diverter y puesta en servicio de la caldera.

Se establecen los siguientes permisivos de rearme de caldera:

a) Diverter cerrado a caldera.

b) No existe ninguna condición de cierre del diverter.

c) Diverter listo.

2.4.2.5 Purga de caldera

Ciclo combinado

El BPS establecerá purga satisfecha si se cumple:

a) “Purga Turbina ciclo combinado satisfecha”. Señal procedente de la turbina.

Paso de ciclo simple a ciclo combinado

Será ahora sí el BPS quien se encargue de la vigilancia y temporización de la purga de la caldera.

Para ello, se esperará recibir las siguientes señales:

a) Caudal de aire/gases > 25%

b) Temperatura de gases de turbina < Tª autoignición – 56ºC.

c) Diverter en posición de purga.

Una vez satisfechos estos permisivos se iniciará automáticamente la temporización de purga de caldera.

Se perderá la purga de caldera si:

a1) Durante la temporización de purga se pierde cualquiera de los permisivos anteriores, o

a2) Si desaparece la señal de “Turbina con combustible”.

2.4.2.6 Disparos de turbina

Las siguientes condiciones provocarán el disparo de la combustión en turbina:

a) Fallo al cierre del diverter ante una condición de cierre del mismo (ver 2.4.2.4).

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia.

2.4.2.7 Limitación de carga de turbina

El BPS enviará la señal cableada a la Turbina “Carga Turbina Limitada” de modo que la temperatura de sus gases de escape sea, al menos, 56 ºC menor a la temperatura de autoignición del combustible usado en la turbina con objeto de evitar que gases calientes procedentes de la turbina puedan provocar la ignición de una eventual atmósfera rica en combustible en los siguientes casos:

a) Purga de caldera no satisfecha

b1) El diverter no está cerrado a caldera, o

b2) Existe fallo en el sellado del cierre del diverter.

Si la turbina no puede cumplir esta limitación de carga o falla en su intento de hacerlo, el sistema de seguridades de la turbina deberá disparar la combustión en turbina.

2.4.2.8 Señales intercambiadas entre turbina y caldera

Turbina		Caldera
	←--	No disparo de combustión en turbina
	←--	Diverter 100% abierto a caldera
	←--	Caldera aislada
Caudal de aire/gases >25 %	-----------------→	
	←--	Carga de turbina no limitada
Turbina con combustible	----------------------→	
Purga turbina ciclo combinado satisfecha	--→	

2.4.3 Calderas sin bypass y con postcombustión

2.4.3.1 Relé MFT.

Al haber quemador existirá el relé MFT.

2.4.3.2 Purga previa al encendido de la turbina

El BMS enviará a la turbina la señal de “Caldera preparada para purga” si:

a) Las válvulas de combustible están cerradas.

b) No hay llama en caldera.

c) No hay condiciones de disparo de caldera/turbina (ver 2.4.3.6).

La turbina comenzará su secuencia de arranque y puesta en servicio a través de la caldera, siendo el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de vigilancia y temporización de la purga previa a su encendido.

Después del encendido de turbina y mientras no se haya satisfecho por primera vez la purga del quemador existirá la limitación de carga de turbina descrita en el apartado 2.4.3.7.

2.4.3.3 Purga de quemador

Después de cualquier disparo del relé MFT o en un arranque inicial de turbina/caldera es necesario hacer una purga del quemador previa a su encendido.

La purga inicial deberá realizarse con temperatura baja de gases de escape de turbina.

Será, ahora sí, el BMS quien se encargue de la vigilancia y temporización de la purga.

Para ello, el BMS establecerá los siguientes permisivos de purga:

a) Caudal de aire/gases > 25 %

b) Caldera preparada para purga

c1) Temperatura de gases de escape de turbina < Tª autoignición-56ºC , o

c2) Carga de turbina no limitada (ver 2.4.3.7).

Una vez satisfechos estos permisivos se iniciará automáticamente la temporización de purga de quemador.

Se perderá la purga de quemador si:

a1) Durante la temporización de purga se pierde cualquiera de los permisivos anteriores, o

a2) Disparo del relé MFT.

2.4.3.4 Rearme del relé MFT

Se establecen los siguientes permisivos de rearme:

a) Purga de quemador finalizada.

b) No existe ninguna condición de disparo del relé MFT.

El relé MFT se rearmará automáticamente cuando:

a) El BMS reciba una orden de encendido del quemador a través del pulsador de encender quemador, produciéndose el rearme y el posterior encendido.

b) Se genere una demanda de postcombustión en automático produciéndose el rearme y posterior encendido, excepto en los siguientes casos donde será necesario que el operador accione el pulsador de encendido para rearmar el MFT:

b1) Si se produce una demanda de postcombustión en automático y el quemador falla al encender dando lugar a una nueva purga de quemador, ó

b2) Si se produce una demanda de postcombustión en automático y una vez en servicio el quemador se produce un disparo de emergencia del mismo.

2.4.3.5 Disparos del relé MFT

Cualquier disparo del relé MFT provocará el cierre de las válvulas de corte de combustible.

Cualquiera de las siguientes condiciones provocará el disparo del relé MFT:

a) Fallo control analógico.

b) Muy alta presión de hogar.

c) Muy baja presión de aire de instrumentos.

d) Pérdida de llama.

e) Última válvula de corte de combustible cerrada.

f) Disparos propios del combustible (temperatura fuel oil, presión diferencial fuel/vapor, etc.).

g) Bajo nivel de agua en calderines.

h) Alta presión de vapor en calderines.

i) Carga de turbina inferior al límite fijado.

j) Condición de disparo de caldera/turbina (ver 2.4.3.6).

k) Caudal aire/gases <25%.

l) Seta de emergencia.

m) Fallo al cierre de cualquier válvula de corte de combustible.

2.4.3.6 Disparos de caldera/turbina

Las siguientes condiciones provocarán el disparo de la combustión en turbina:

a) Muy bajo nivel de calderines.

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia.

d) Muy alta presión de calderines.

e) Muy baja presión de aire de refrigeración de detectores de llama.

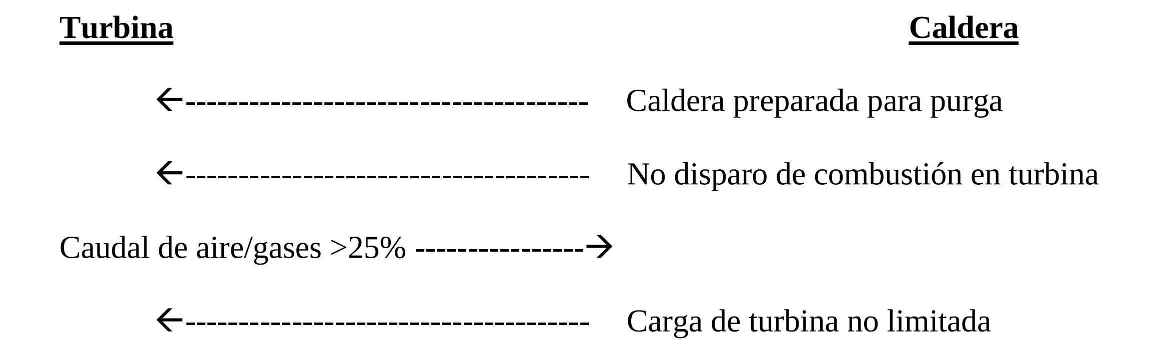
2.4.3.7 Limitación de carga de turbina

Después del encendido inicial de la turbina y hasta que se satisfaga por primera vez la purga del quemador descrita en el apartado 2.4.3.3. el BMS enviará la señal cableada a la Turbina “Carga Turbina Limitada” de modo que la temperatura de sus gases de escape sea, al menos, 56 ºC menor a la temperatura de autoignición del combustible usado en la turbina con objeto de evitar que gases calientes procedentes de la turbina puedan provocar la ignición de una eventual atmósfera rica en combustible.

Una vez satisfecha la purga inicial del quemador, la limitación de carga a la turbina no volverá a aparecer hasta un nuevo disparo de la misma.

Si la turbina no puede cumplir esta limitación de carga o falla en su intento de hacerlo, el sistema de seguridades de la turbina deberá disparar la combustión en turbina.

2.4.3.8 Señales intercambiadas entre turbina y caldera



2.4.4 Calderas con bypass y con postcombustión

2.4.4.1 Relé MFT.

Al haber quemador existirá el relé MFT.

2.4.4.2 Purga previa al encendido de la turbina

Se podrá decidir arrancar la instalación en ciclo simple o combinado.

Purga a través de caldera (ciclo combinado)

El operador podrá (si existe permiso de apertura – ver 2.4.4.3) abrir el diverter hasta el 100% y, entonces, el BMS enviará a la turbina la señal “Caldera preparada para purga” si:

a) Las válvulas de combustible están cerradas.

b) No hay llama en caldera.

c) Diverter 100% abierto a caldera.

La turbina comenzará su secuencia de arranque y puesta en servicio a través de la caldera, siendo el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de vigilancia y temporización de la purga previa a su encendido.

Después del encendido de turbina y mientras no se haya satisfecho por primera vez la purga del quemador existirá la limitación de carga de turbina descrita en el apartado 2.4.4.9.

Purga a través del bypass (ciclo simple)

El BMS enviará a la turbina la señal “Caldera Aislada” cuando:

a) Confirmación finales de carrera de diverter cerrado a caldera

b) No hay fallo en el sistema de sello del diverter.

La turbina comenzará su secuencia de arranque y puesta en servicio a través del bypass, siendo el sistema de seguridades de la turbina quien se encargue de vigilancia y temporización de la purga previa a su encendido.

2.4.4.3 Permisos de apertura de diverter

Después de cualquier condición de cierre del diverter o en un arranque inicial, éste se podrá volver a abrir si se cumplen los siguientes permisivos:

a) Caldera rearmada.

b) Diverter listo.

c) Condiciones de cierre de diverter no presentes.

d) Válvulas de combustible cerradas.

e) Llama no detectada

f1) Temperatura de gases de turbina <Tª autoignición-56ºC, o

f2) No existe limitación de carga de turbina (ver 2.4.4.9).

2.4.4.4 Condiciones de sierre del diverter/rearme de caldera.

Condiciones de cierre del diverter

Cualquiera de las siguientes condiciones provocará el cierre del diverter:

a) Muy bajo nivel de calderines.

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia.

d) Muy alta presión de calderines.

e) Muy baja presión de aire de refrigeración de detectores de llama.

Rearme de caldera

Después de cualquier condición de cierre del diverter, el operador deberá comprobar la causa que lo motivó y, una vez subsanada, deberá actuar sobre el pulsador de rearmar caldera, como requisito imprescindible para el inicio de la apertura del diverter y puesta en servicio de la caldera.

Se establecen los siguientes permisivos de rearme de caldera:

a) Diverter cerrado a caldera.

b) No existe ninguna condición de cierre del diverter.

c) Válvulas de combustible cerradas.

d) Llama no detectada.

e) Temperatura de gases de turbina < Tª autoignición –56ºC.

f) Diverter listo.

2.4.4.5 Purga de quemador

Será necesario hacer una purga del quemador si:

a) El caudal de aire/gases a través de caldera es <25 %.

b) Después de cualquier disparo del relé MFT.

En el primer caso la purga deberá realizarse con temperatura baja de gases de escape de turbina.

Será ahora sí el BMS quien se encargue de la vigilancia y temporización de la purga.

Para ello, el BMS esperará recibir las siguientes señales:

a) Caudal de aire/gases > 25 %

b) Diverter en posición de purga.

c) Las válvulas de combustible están cerradas.

d) No hay llama en caldera.

Una vez satisfechos estos permisivos se iniciará automáticamente la temporización de purga de quemador.

Se perderá la purga de quemador si:

a) Durante la temporización de purga se pierde cualquiera de los permisivos anteriores, o

b) Disparo del relé MFT.

2.4.4.6 *Rearme del relé MFT*

Se establecen los siguientes permisivos de rearme:

a) Purga quemador finalizada.

b) No existe ninguna condición de disparo del relé MFT.

El relé MFT se rearmará automáticamente cuando:

a) El BMS reciba una orden de encendido del quemador a través del pulsador de encender quemador, produciéndose el rearme y el posterior encendido.

b) Se genere una demanda de postcombustión en automático produciéndose el rearme y posterior encendido, excepto en los siguientes casos donde será necesario que el operador accione el pulsador de encendido (caso anterior) para rearmar el MFT:

b1) Si se produce una demanda de postcombustión en automático y el quemador falla al encender dando lugar a una nueva purga de quemador, o

b2) Si se produce una demanda de postcombustión en automático y una vez en servicio el quemador se produce un disparo de emergencia del mismo.

2.4.4.7 *Disparos del relé MFT*

Cualquier disparo del relé MFT provocará el cierre de las válvulas de corte de combustible.

Cualquiera de las siguientes condiciones provocará el disparo del relé MFT:

a) Fallo control analógico.

b) Muy alta presión de hogar.

c) Muy baja presión de aire de instrumentos.

d) Pérdida de llama.

e) Última válvula de corte de combustible cerrada.

f) Disparos propios del combustible (temperatura fuel-oil, presión dif. Fuel/vapor, etc.).

g) Bajo nivel de agua en calderines.

h) Alta presión de vapor en calderines.

i) Carga de turbina inferior al límite fijado.

j) Cualquier condición de cierre de diverter.

k) Diverter por debajo de posición mínima.

l) Caudal aire/gases <25%.

m) Seta de emergencia.

n) Fallo al cierre de cualquier válvula de corte de combustible.

2.4.4.8 Disparos de turbina

Las siguientes condiciones provocarán el disparo de la combustión en turbina:

a) Fallo al cierre del diverter ante una condición de cierre del mismo (ver 2.4.4.4).

b) Muy alta presión de gases de escape de turbina.

c) Seta de emergencia.

2.4.4.9 Limitación de carga de la turbina

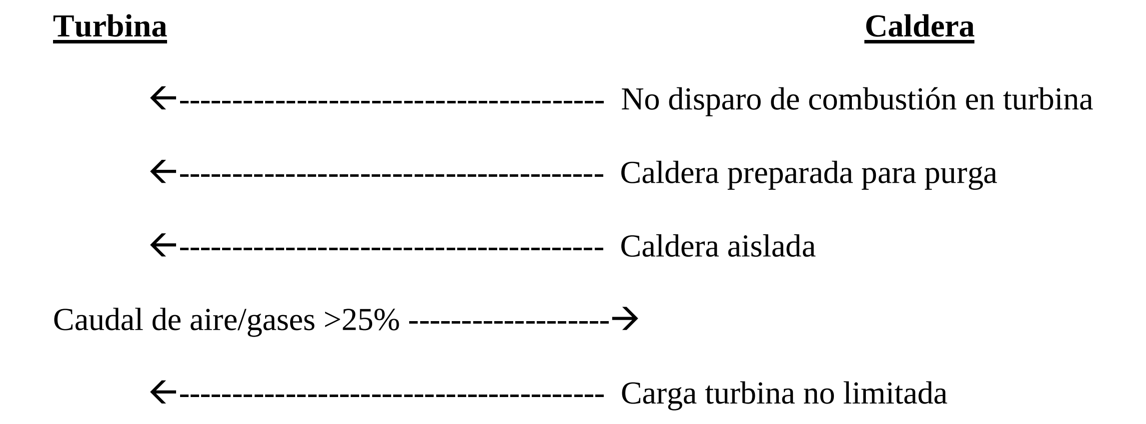
El BMS enviará la señal cableada a la turbina “Carga Turbina Limitada” de modo que la temperatura de sus gases de escape sea, al menos, 56 ºC menor a la temperatura de autoignición de los combustibles usados en la caldera o turbina con objeto de evitar que gases calientes procedentes de la turbina puedan provocar la ignición de una eventual atmósfera rica en combustible en las siguientes condiciones:

a) Fallo en el sellado del cierre del diverter, o

b) Diverter no cerrado a caldera y purga de quemador no satisfecha. Sólo existirá limitación en este caso si la pérdida de la purga del quemador es por caudal a través de caldera inferior al 25%.

Si la turbina no puede cumplir esta limitación de carga o falla en su intento de hacerlo, el sistema de seguridades de la turbina deberá disparar la combustión en turbina.

2.4.4.10 Señales intercambiadas entre turbina y caldera



3 CONTROL DE CALDERAS

3.1 Introducción

El sistema de control de una caldera es la herramienta mediante la cual se consiguen los equilibrios de masa y de energía de la misma ante las variaciones en la demanda de los consumidores. La energía y la masa introducidas en la caldera deben ser reguladas para conseguir las condiciones de salida deseadas. Las medidas de las variables del proceso darán al sistema la información necesaria para ello. En la Figura 3-1 se muestra mediante un diagrama de bloques el esquema general del control de una caldera.

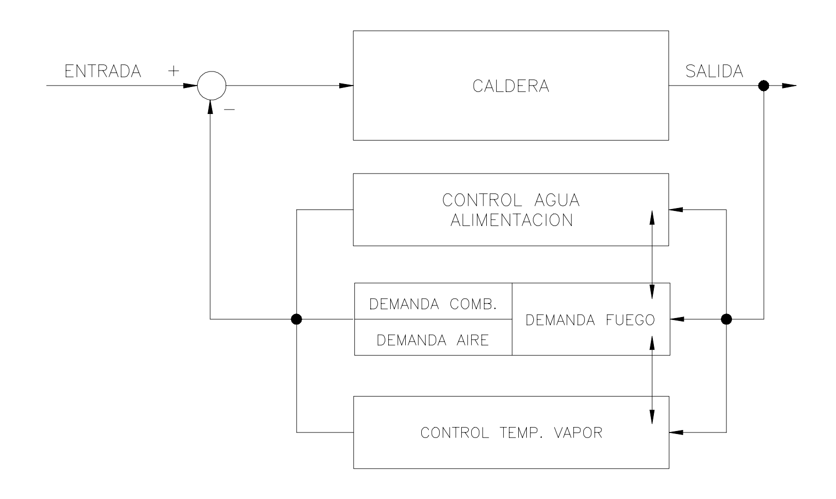


Figura 3-1. Esquema de control básico

Desde el punto de vista del equilibrio energético se debe generar una demanda de carga (de fuego), de la cual se generarán a su vez las demandas de combustible y aire, que proporcionarán el aporte de energía necesario para mantener el equilibrio respecto a la extraída en el vapor. El control de nivel será el encargado de mantener el equilibrio entre la masa saliente en forma de vapor y la entrante en forma de agua. La temperatura del vapor será mantenida mediante el control de temperatura de éste, con su influencia, tanto en el equilibrio de energía como de masa.

En el sistema de control de una caldera, las diferentes variables interaccionan sobre los diferentes subsistemas. Así, la demanda de carga influirá sobre la temperatura de vapor, el caudal de agua sobre la presión de vapor que a su vez es la causante de la demanda de carga. Por lo tanto, todo el sistema debe ser coordinado y implementado de forma que minimice los efectos de dichas interacciones, puesto que el propio diseño del sistema las puede aumentar.

La primera consideración como consecuencia de lo anterior es en donde se requiere un sistema multivariable o lazos simples independientes. En general, usaremos lazos de control simples en aquellas variables que no influyen, ni están influidas, por otras externas al lazo, como pudieran ser, la presión de suministro de combustibles, de conductos, etc., siempre que sus valores de consigna sean fijos y no, función de otras variables del sistema.

Usaremos una estructura multivariable, por el contrario, cuando las variables afectan o están afectadas por más de una variable medida o manipulada. En este caso, un sistema cuyas acciones son tomadas en paralelo está generalmente menos interaccionado que uno que las toma en serie. Un ejemplo de esto sería el control de combustión en el cual la cantidad de aire y combustible se modifican a la vez en lugar de una tras de otra, en cuyo caso una perturbación en la primera variable se propaga en la segunda perturbando está y viceversa.

Otra regla general de implementación será el uso de circuitos de compensación de forma que las perturbaciones en las variables no afecten al proceso. Un ejemplo de esto sería la compensación según los combustibles que se estén usando, de forma que la puesta en servicio de un nuevo combustible no modifique el combustible total que se introduce en el hogar.

Aunque los lazos de control tienen de alguna forma tiempos muertos, en la mayoría de los casos se puede asumir que una respuesta de primer orden es adecuada para analizar el comportamiento de los lazos de una caldera. Con esta premisa, las constantes de tiempo para las distintas variables podemos asumirlas como:

- Caudal. Segundos
- Caída de presión. Segundos
- Nivel. De segundos a minutos.
- Aumento de presión. Minutos.
- Temperatura. Minutos.
- Presión en líquidos. Milisegundos a segundos.

Otro factor a tener en cuenta en el diseño del sistema de control, es la interferencia de los ruidos en el sistema, ya sean ruidos en las medidas o en el proceso. Un ejemplo del primer caso sería el ruido típico en la medida de un caudal, y del segundo la pulsación que se produce en el hogar. Dependiendo de la relación entre el ruido y la medida en sí, puede hacerse necesario la implementación de algún tipo de filtrado, aumento en la calibración de los transmisores, etc..

3.2 Controles auxiliares

3.2.1 Control de presión del fuel oil

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener la presión del suministro de fuel oil en su valor adecuado. El mantener la presión correcta en el suministro del fuel oil será un elemento necesario para poder realizar un control de caudal, de acuerdo con la demanda de carga, satisfactorio.

Filosofía del control

La presión de impulsión de las bombas de suministro de fuel oil es variable en función del caudal que están suministrando. Dicho caudal a su vez dependerá lógicamente del consumo. Para conseguir que esta presión se mantenga constante independientemente del caudal suministrado se regulará el retorno de combustible al tanque de almacenamiento, de forma que este caudal variable compense las variaciones del caudal de suministro a los quemadores. Para ello utilizaremos un control PI simple como el de la Figura 3-2.

Si la presión aguas abajo de las bombas sube, la válvula de retorno abrirá en orden a reducirla y viceversa.

3.2.2 Control de temperatura del fuel oil

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener la temperatura del fuel oil en el valor deseado. El mantener una temperatura adecuada en el suministro del fuel oil permitirá mantener la viscosidad de éste dentro de un rango de trabajo imprescindible para su correcta atomización, que proporcione una combustión óptima.

Filosofía del control

Para adecuar la temperatura del fuel oil a su nivel de trabajo se colocan a la salida de las bombas unos calentadores de vapor. Mediante la variación del caudal de vapor a través de los calentadores se conseguirá una mayor o menor transferencia de calor que hará controlable la temperatura del fuel oil ante variaciones en el caudal de suministro. El lazo sería un PI simple como el que se muestra en la Figura 3-3

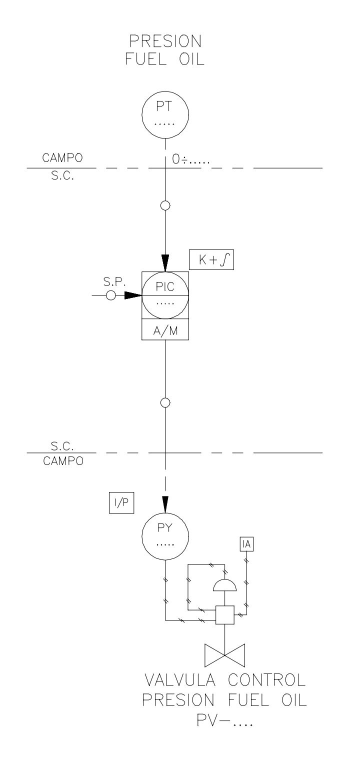


Figura 3-2. Control de presión del fuel oil

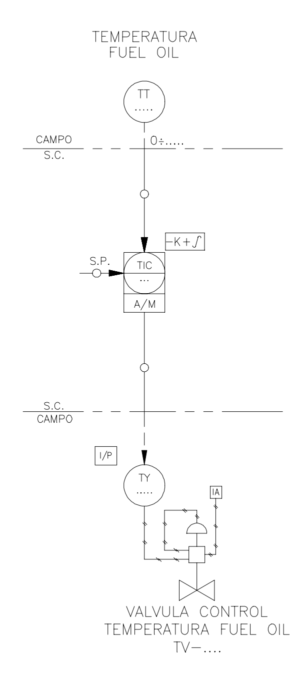


Figura 3-3. Control temperatura fuel oil

Si la temperatura de vapor aguas abajo del calentador sube, la válvula de suministro de vapor cerrará en orden a reducir el caudal al calentador y reducir el calentamiento, y viceversa.

Pudiera darse el caso de que el suministro del combustible líquido sea variable en su composición de forma continua y que pueda modificar su viscosidad para una temperatura dada. En este caso, si el sobrecoste está justificado por el consumo o lo crítico de la instalación se puede usar un control PI+PI en cascada como el de la Figura 3-4, en donde la viscosidad será la variable primaria y la temperatura la secundaria. De esta forma, las variaciones de la viscosidad provocarán la modificación del punto de consigna de la temperatura necesaria para mantener la viscosidad requerida. Si la viscosidad baja la salida de su controlador bajará en orden a reducir la consigna del regulador de temperatura que cerrará la válvula de vapor, al igual que en el caso de que la temperatura supera la requerida.

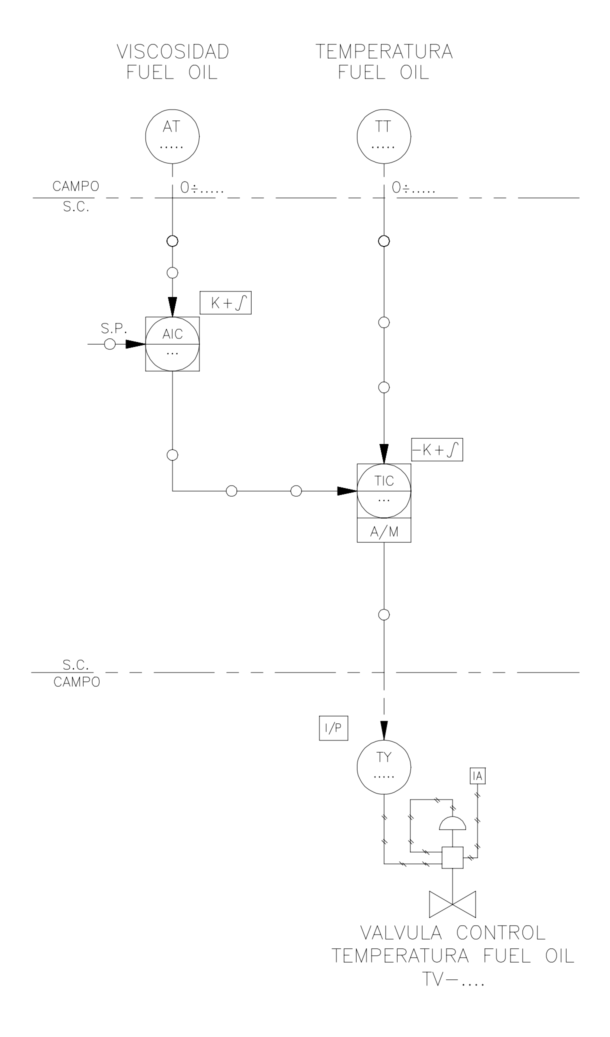


Figura 3-4. Control en cascada de temperatura del fuel oil

Enclavamientos

Cuando el controlador secundario está en manual o en modo local (si existe) el primario debe estar en manual. Otra opción es mantener el controlador primario en modo seguimiento de forma que su salida sea igual a la variable de proceso del secundario, de forma que el paso a automático o a consigna remota del secundario haga entrar en control directamente al primario.

Si el primario está en manual el secundario se pasará o no a manual dependiendo si se permite o no el control con consigna local en el secundario.

3.2.3 Control de presión del vapor de atomización

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener la presión del vapor de atomización en un valor adecuado. El mantener la presión adecuada permitirá asegurar que la atomización del combustible líquido es correcta para el rango de funcionamiento de éste, lo que es imprescindible para una combustión óptima.

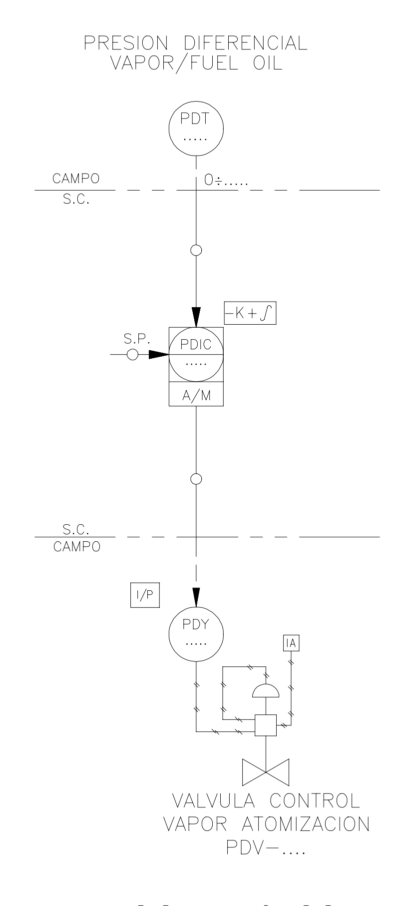


Figura 3-5. Control de presión del vapor de atomización

Filosofía del control

Para poder mantener la presión del vapor en su punto de consigan se dispondrá de una válvula de control en la línea de aportación de vapor a los quemadores. Para una correcta atomización, normalmente, se debe mantener una presión diferencial vapor/fuel oil constante. Para ello utilizaremos un control PI simple como el que se indica en la Figura 3-5.

En algunas ocasiones podemos encontrarnos el caso de que la diferencial varía para las distintas cargas del combustible. En este caso, la consigna de presión vendrá dada en función de la presión del combustible (Figura 3-6).

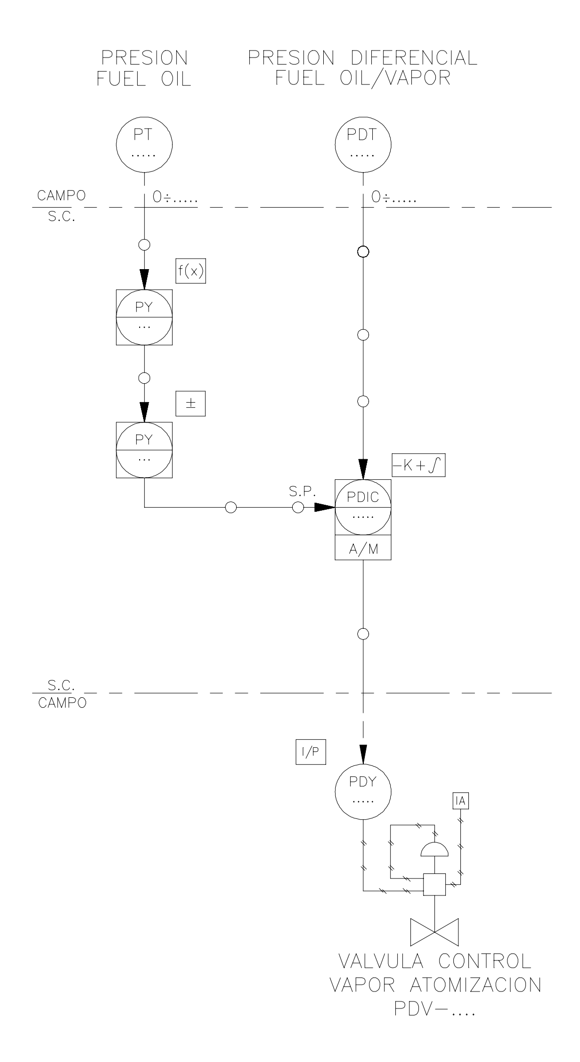


Figura 3-6. Control de presión del vapor con consigna variable

3.2.4 *Control de presión del desgasificador*

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener la presión en el desgasificador en un valor adecuado. El mantener la presión adecuada permitirá asegurar que el agua de aportación a la caldera está libre de gases disueltos que pueden provocar graves corrosiones en ella.

Filosofía del control

Para mantener el tanque del desgasificador a la presión deseada se instala una válvula de control de vapor en la entrada de la parte de desgasificación. Este vapor se mezcla con el agua introducida en forma pulverizada llevándola a la temperatura de saturación del tanque, lo que nos asegura la liberación de los gases disueltos. El control de dicha presión se realizará mediante el lazo PI simple de la Figura 3-7. En él si la presión en el desgasificador sube la válvula cerrará aportando menos vapor y reduciéndose consecuentemente la presión, y viceversa.

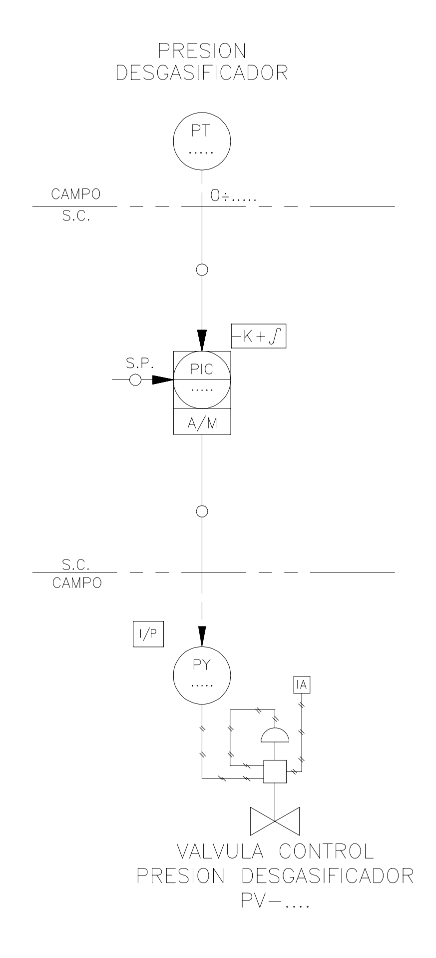


Figura 3-7. Control de presión del desgasificador

3.2.5 Control de nivel del desgasificador

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener en el desgasificador el nivel deseado. El mantener dicho nivel asegura un suministro continuo de agua a la caldera ante diferentes condiciones o variaciones en la demanda y una presión adecuada en la aspiración de las bombas de agua de alimentación que garantiza su correcto funcionamiento.

Filosofía del control

Para mantener el nivel del tanque del desgasificador en su valor deseado se dispone de una válvula de control en la aportación de agua al mismo. Mediante la aportación de más o menos agua mantendremos constante el nivel en el punto deseado. Para ello se suele utilizar el control PI simple de la Figura 3-8. En él, al aumentar el nivel se cierra la válvula para disminuir la aportación y viceversa.

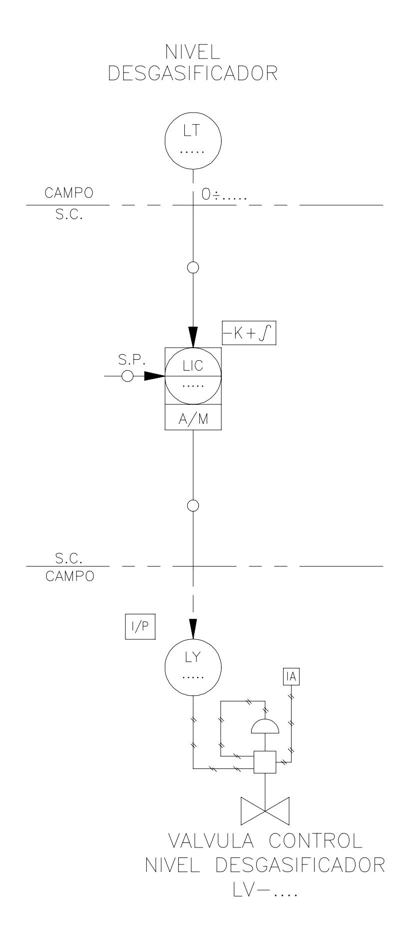


Figura 3-8. Control de nivel del desgasificador

En instalaciones en donde las producciones son altas y existen variaciones de carga amplias y frecuentes, se suele usar un diseño de lazo de tres elementos como en el que indica en la Figura 3-9. Con este diseño se tiene en cuenta el equilibrio entre la masa de agua aportada y extraída además de la consigna de nivel deseado.

Así, el caudal de agua de alimentación (extracción del desgasificador) se utiliza como índice de la posición de la válvula de aportación de agua/condensado al desgasificador, usándose el error en el nivel como corrección de dicha posición.

Esta configuración la veremos más adelante como estrategia de control en el nivel del calderín.

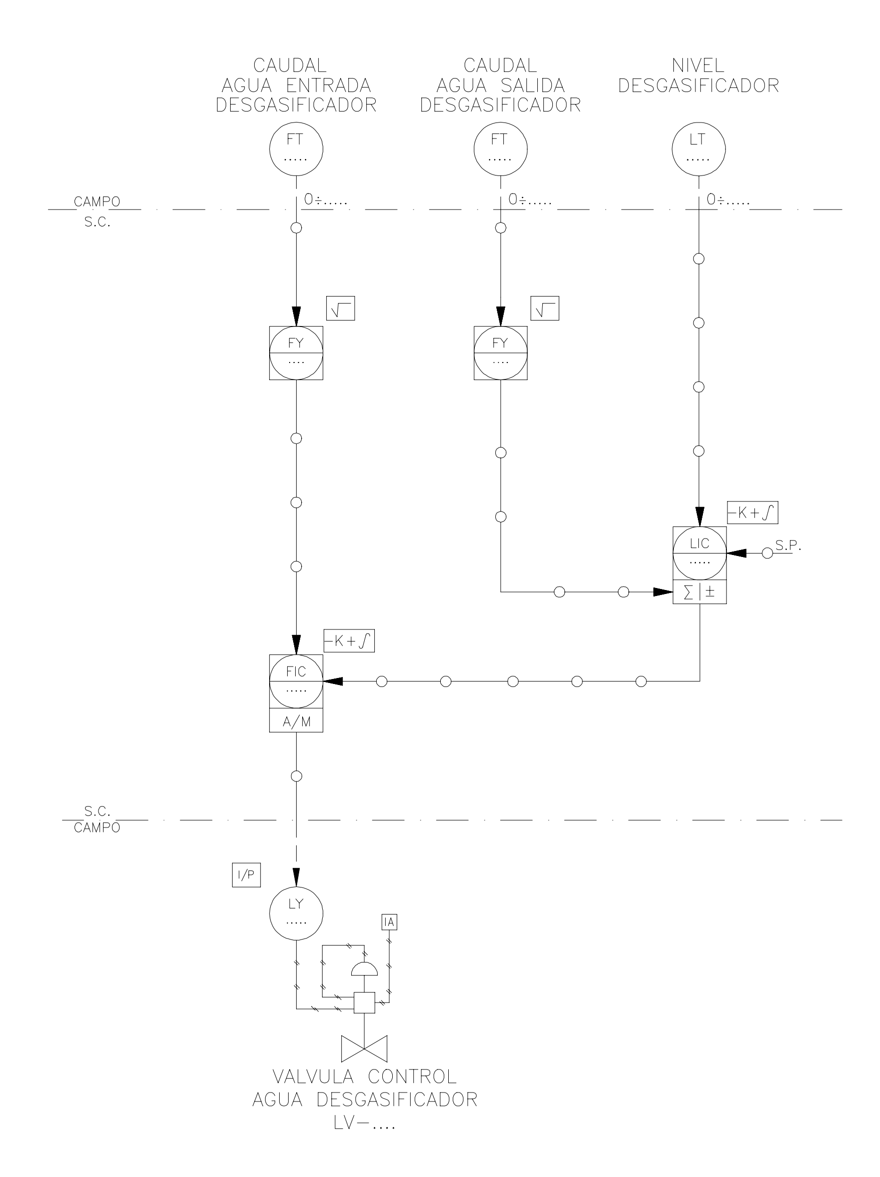


Figura 3-9. Control de nivel del desgasificador a tres elementos

En aquellas calderas utilizadas para la generación de energía en las que el agua de aportación al desgasificador se toma del circuito de condensados, siendo el agua de aportación al sistema introducida en el condensador, suelen usarse otras

estrategias en las que el control de la válvula de agua al desgasificador usa como variable de proceso no sólo el nivel del desgasificador, sino también el nivel del condensador, como se representa en la Figura 3-10.

Esta estrategia se basa en el hecho de que al sustraer la aportación al desgasificador del circuito de condensados, ésta tiene que tener en cuenta el nivel existente en el condensador a fin de introducir las mínimas perturbaciones en él que pueden ocasionar modificaciones en su nivel de vacío.

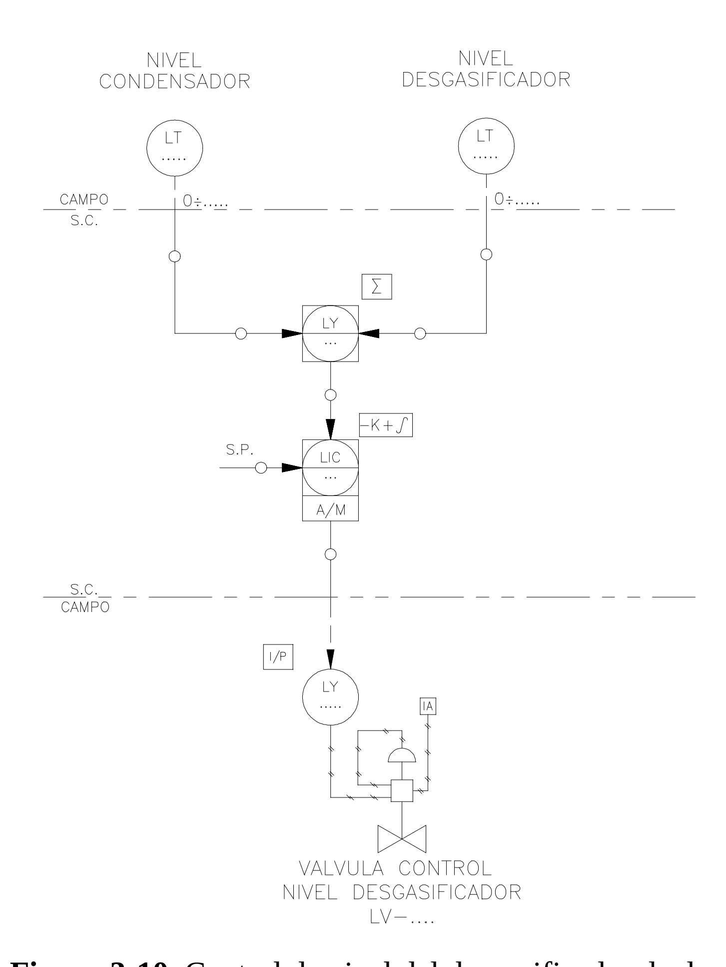


Figura 3-10. Control de nivel del desgasificador de dos elementos

Enclavamientos

Cuando el controlador secundario está en manual o en modo local (si existe) el primario debe estar en manual. Otra opción es mantener el controlador primario en modo seguimiento de forma que su salida sea igual a la variable de proceso del secundario, de forma que el paso a automático o a consigna remota del secundario haga entrar en control directamente al primario.

Si el primario está en manual el secundario se pasará o no a manual dependiendo si se permite o no el control con consigna local en el secundario.

3.2.6 Control de la purga continua

Objetivo

El objetivo de este control es mantener la conductividad del agua de caldera en su nivel deseado. El mantener la conductividad en unos niveles óptimos evitará la formación de depósitos o arrastres de sólidos en el vapor que pueden ocasionar serios perjuicios tanto a la caldera como a los consumidores del vapor de ésta.

Filosofía del control

Para mantener los sólidos disueltos en el agua a un nivel aceptable, se dispone de una extracción en la parte baja del calderín de forma que parte de este agua se circula hacia un tanque de purga continua. Una forma de encarar este lazo es mediante un control de tres posiciones basándose en la conductividad medida según se muestra en la Figura 3-11.

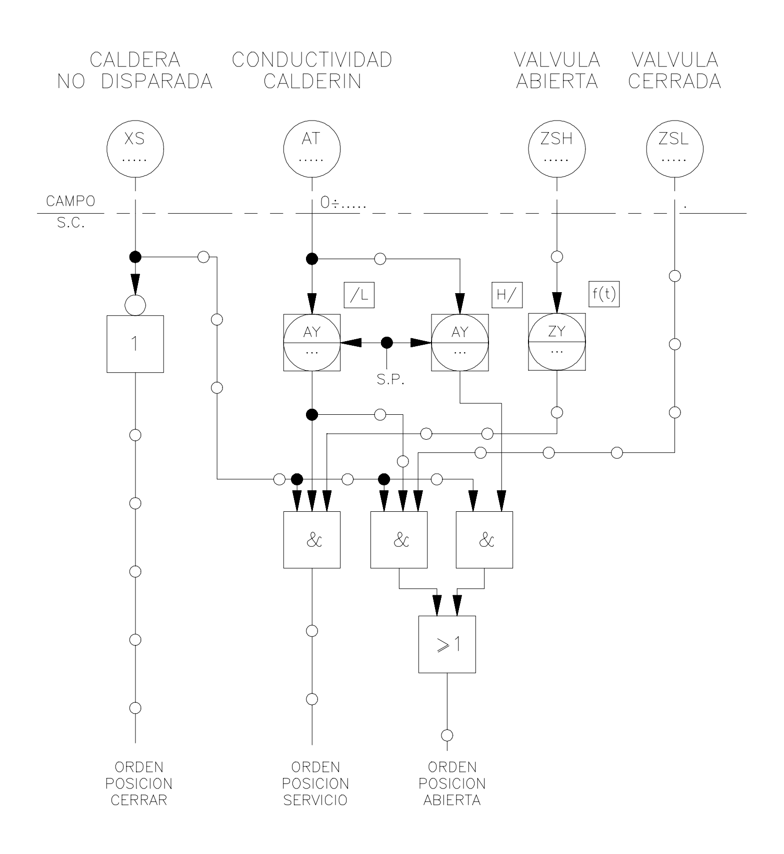


Figura 3-11. Control de conductividad de tres posiciones

La válvula de purga se mantendrá habitualmente en una posición de servicio. Cuando la conductividad medida excede los límites deseados la válvula se llevará a una posición superior al objeto de aumentar la purga. Cuando la caldera está disparada la válvula se mantendrá cerrada. Al arrancarse la caldera, la válvula

pasa inicialmente a su posición abierta y tras un tiempo en ella, y con la conductividad por debajo del valor fijado, se mueve a la posición de servicio.

La cantidad de purga de una caldera viene fijada normalmente como un porcentaje del caudal de agua de alimentación. Por este motivo, a fin de desperdiciar la mínima energía en calderas de variaciones de carga frecuentes, se puede diseñar el lazo para que trabaje de forma continua usando el caudal de agua como índice de la posición de la válvula de purga, como se muestra en la Figura 3-12.

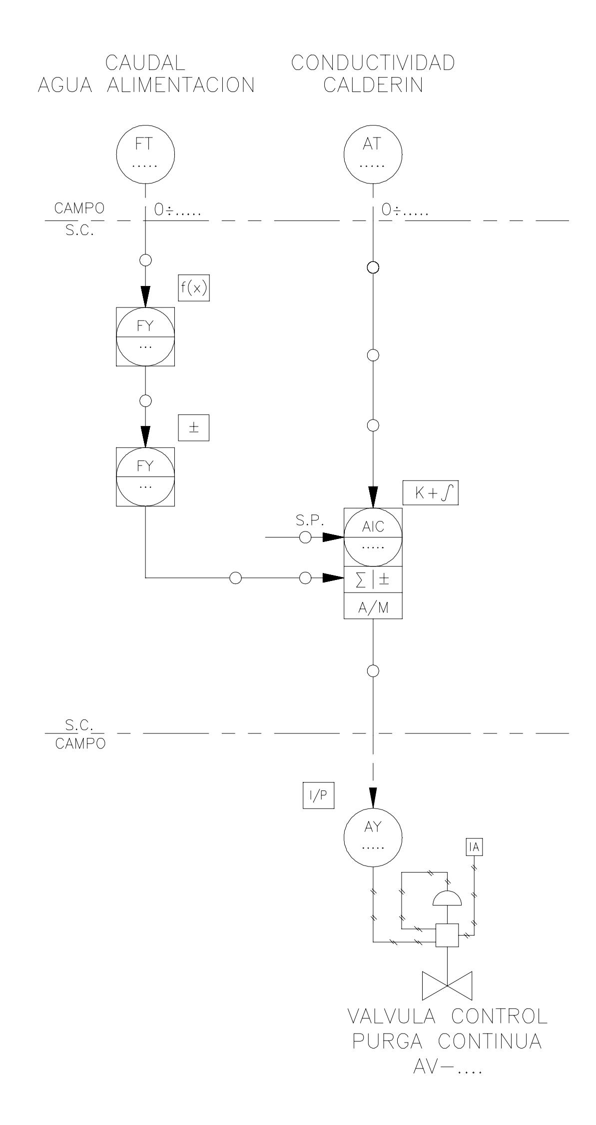


Figura 3-12. Control de conductividad de dos elementos

La válvula de control se sitúa en una posición calculada de acuerdo con la aportación de agua de alimentación. El error en la conductividad actúa como corrección de dicha posición.

3.2.7 Control del nivel del tanque de purga continua

Objetivo

El objetivo de este control es mantener el nivel en el tanque de purga en el valor deseado. Al mantener el nivel en su rango de operación se mantiene un sello de agua adecuado por un lado y por otro se asegura la correcta descarga de la purga en el tanque.

Filosofía del control

Para mantener el nivel del tanque de purga en su valor deseado se dispone de una válvula de control en la extracción de agua al mismo. Mediante la extracción de más o menos agua mantendremos constante el nivel en el punto deseado. Para ello se usa el control PI simple de la Figura 3-13.

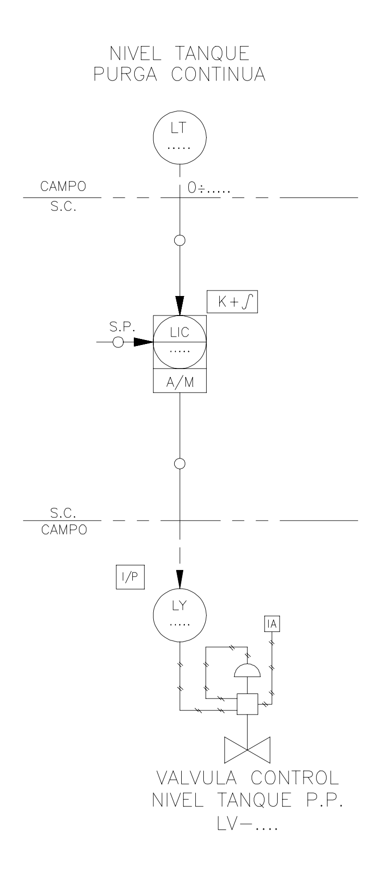


Figura 3-13. Control de nivel del tanque de purga

Cuando el nivel del tanque aumente la válvula de extracción abrirá y viceversa.

3.3 Control de nivel/agua de alimentación

Consideraciones sobre las medidas

La medida del nivel de calderín suele hacerse mediante transmisores de presión diferencial (Figura 3-14). Esta medida está basada en la diferencia de presión generada por las dos columnas conectadas al transmisor. La primera es una columna fija o de referencia que mantiene una altura constante. La segunda será la columna de agua y de vapor existente en el calderín.

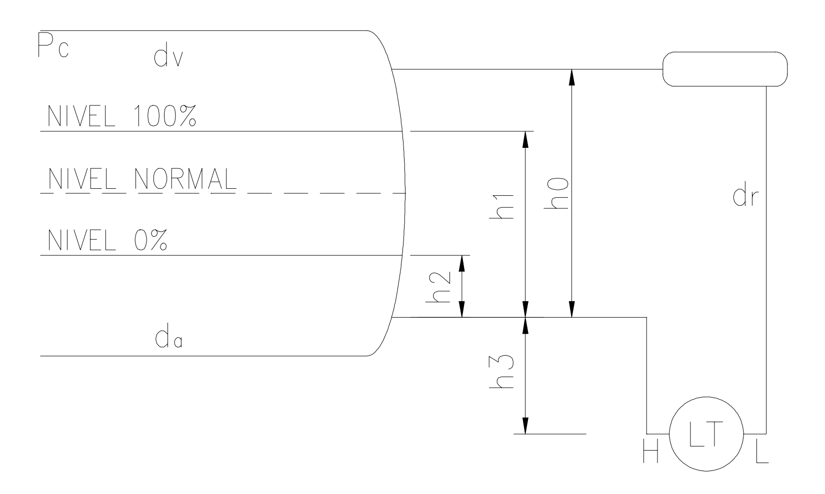


Figura 3-14. Medida del nivel del calderín

La presión en el lado de alta del transmisor vendrá dada para los niveles mínimo y máximo por:

$$P_{nmin}=P_c+h_3*d_r+h_2*d_a+(h_0-h_2)*d_v$$

$$P_{nmax}=P_c+h3*d_r+h_1*d_a+(h_0-h_1)*d_v$$

Y la de la columna de referencia por:

$$P_{cr}=(h_3+h_0)*d_r$$

De forma que la calibración para el 0% será de P_{nmin}-P_{cr} y la del 100% de P_{nmax} - P_{cr}. Nótese, que el resultado de esta calibración será de –x a –y. Esto se debe a que se suele preferir que la señal del transmisor aumente con el nivel.

El transmisor se calibrará de forma que su rango transmita un margen de trabajo en torno al nivel normal para unas condiciones de operación nominales. Como consecuencia, el peso de la columna de nivel variará si las condiciones de presión en el calderín varían, al modificar éstas la densidad del agua y del vapor. Esta variación de la densidad es mayor cuanto mayor es la presión de operación de trabajo. Debido a esto, la medida de nivel para el control se suele corregir para

presiones superiores a 35 bares (Figura 3-15). La presión del calderín con la caldera en operación se mantiene constante, y las variaciones en dicha presión vendrán dadas por los cambios de carga, que con un control de combustión correctamente ajustado no serán de una magnitud excesiva. Esto conlleva que el cambio en la densidad tampoco será muy grande para las calderas que trabajen a presiones no muy altas, y por tanto no habrá un error muy grande en la medida de nivel. Sin embargo, trabajando a presiones altas o por supuesto a presión variable o deslizante, esta modificación de la densidad si puede introducir errores apreciables en la medida de nivel.

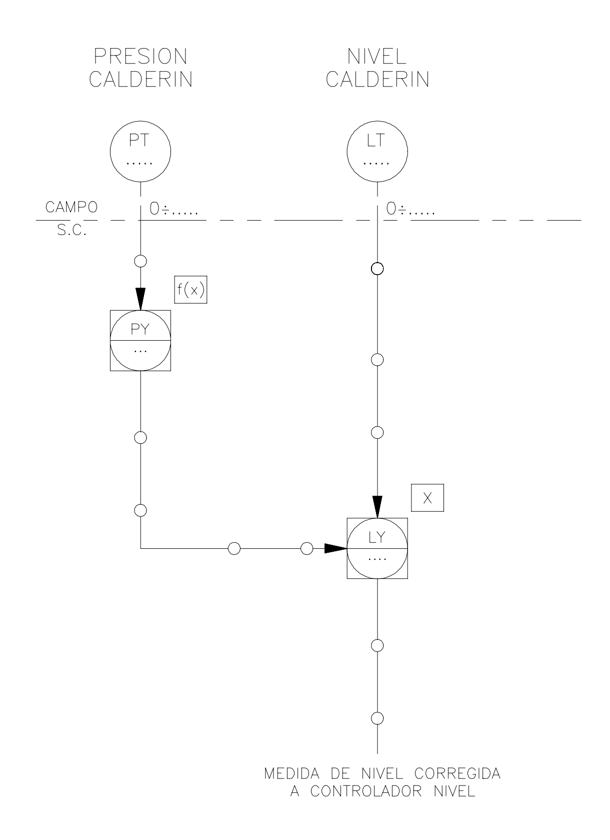


Figura 3-15. Corrección del nivel por presión

Algo similar ocurre con las medidas de caudal de vapor y agua. Cuando dichas mediciones están basadas en medida de presión diferencial, ésta a su vez está fijada en unas condiciones de presión y temperatura. Cuando estas condiciones son modificadas, las mediciones deben ser corregidas al modificarse la densidad del fluido y por tanto la masa de éste. En el caso del vapor, la corrección debe ser hecha por presión y temperatura al influir ambas variables en la densidad de éste. En el caso del agua suele ser menos habitual dicha corrección, y sólo cuando puedan existir grandes variaciones en su temperatura, ésta se usa como factor de corrección, al poder considerarse el agua un fluido incompresible y por lo tanto no influido por la presión.

Objetivo

Los principales objetivos del control de nivel en una caldera son los siguientes:

1. Controlar el nivel en el valor deseado.

2. Minimizar la interacción con el control de combustión.

3. Crear suaves cambios en el agua almacenada ante los cambios de carga.

4. Equilibrar adecuadamente la salida de vapor con la entrada de agua.

5. Compensar las variaciones de presión del agua de alimentación sin perturbar el proceso ni modificar el punto de operación.

Particularmente importante es el minimizar la interacción con el control de combustión. Esta interacción se acentúa con el suministro desigual de agua de alimentación, que afecta a la presión de vapor y que conlleva modificaciones en la demanda de fuego sin existir variaciones en la demanda de vapor. Estas variaciones en el fuego de la caldera producen a su vez incrementos y decrementos en la presión con las consiguientes perturbaciones en el calderín que acentúan el problema.

Filosofía del control

El control de nivel de una caldera tiene varias particularidades debido su especial comportamiento. Las principales son el esponjamiento y la contracción que se producen en el nivel ante los cambios de carga de vapor, y que modifica el nivel en la dirección opuesta a la que intuitivamente se espera que ocurra ante dicho cambio de carga. Así, ante un incremento en la demanda de vapor, el nivel en lugar de disminuir al extraerse más vapor, se incrementa temporalmente debido a la disminución de la presión provocada por el aumento de consumo. Esta disminución en la presión provoca un aumento en la evaporación y en el tamaño de las burbujas de vapor (esponjamiento) que hace aumentar el nivel. Por el contrario, ante una disminución en la carga, en lugar de producirse un aumento en el nivel debido a la disminución del caudal de vapor, se produce una disminución debida al aumento de la presión. Esta origina una menor evaporación y un menor tamaño en las burbujas de vapor (contracción) que hace disminuir el nivel.

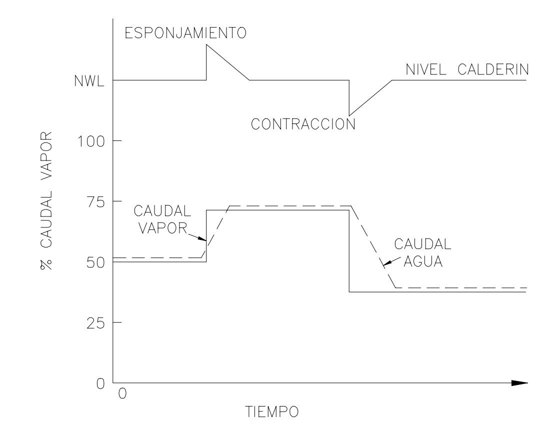


Figura 3-16. Relaciones deseadas agua-vapor

Para lograr los objetivos básicos mencionados, existe un patrón que indica la relación deseable entre el caudal de agua, de vapor y el nivel del calderín (Figura 3-16). Cuando se incremente el caudal de vapor, se incrementará el caudal de agua si no se ha producido un esponjamiento en el nivel. Un incremento en el nivel producirá un decremento en el caudal de agua si no se ha incrementado el caudal de vapor.

Si la influencia del nivel del calderín es muy grande, se producirá una disminución en el caudal de agua, que provocará finalmente que el nivel sea excedido para poder aportar esa pérdida de agua. Si la influencia del caudal de vapor es muy grande, el incremento inicial de aportar más agua, mantendrá por más tiempo el nivel por encima de su punto de consigna (Figura 3-17).

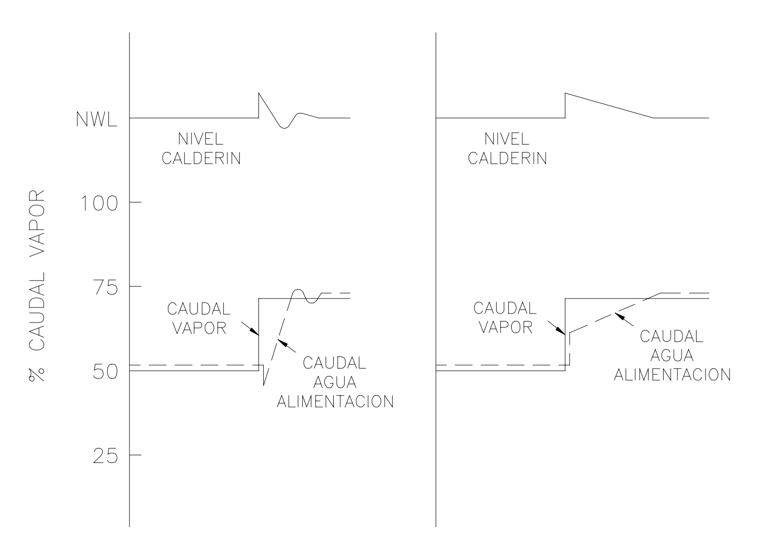


Figura 3-17. Influencias del nivel y del caudal de vapor

La acción correctora adecuada sería la mostrada en la Figura 3-16 en la que el caudal de agua no cambia inmediatamente, sino gradualmente para acompañar al caudal de vapor una vez que el nivel ha vuelto a su punto de trabajo tras el transitorio.

Control a un elemento

Por todo lo indicado, el típico control de nivel de un elemento que mide la variable y regula el caudal de aportación o extracción mediante un controlador PI no es el adecuado para el calderín de una caldera, aunque en aquellas calderas pequeñas en las el calderín es relativamente grande, y en donde los cambios de carga se producen de una manera lenta, de forma que la presión en el calderín no se ve muy afectada por dichos cambios, se puede implementar este tipo de control de un elemento como se muestra en la Figura 3-18.

En el ajuste de este lazo debe tenerse en cuenta que, aunque para lograr una regulación mejor el valor de la ganancia puede tener que ser grande, esto contribuiría a una mayor interacción entre el control de nivel y el control de

combustión (Figura 3-19). Por otra parte, el ajuste de la acción integral en el lazo debe ser lento puesto que en los cambios de carga el control se mueve en la dirección opuesta. Sin embargo, el incluir la acción integral nos permitirá disminuir la ganancia minimizando la interacción con el control de combustión.

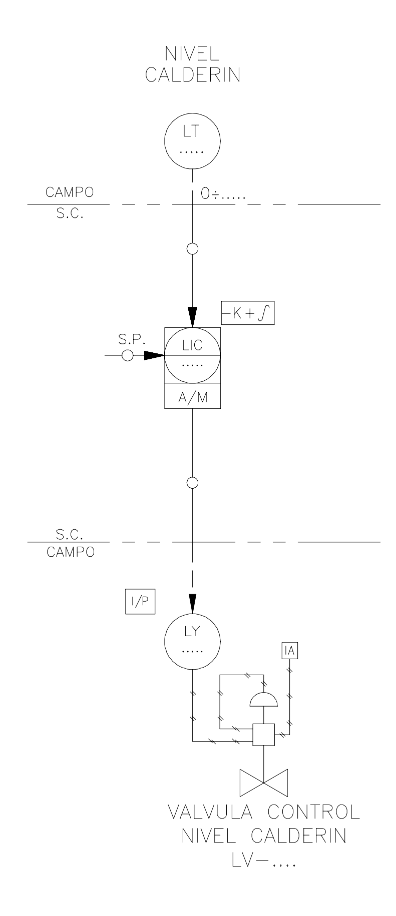


Figura 3-18. Control de nivel a un elemento

El elemento final de control debe tener una relación lineal con la señal de control puesto que las desviaciones en torno al punto de consigna representan cantidades, de agua específicas para toda la carga de caldera. Si este elemento final es una válvula de control, la señal de apertura debe ser lineal respecto al caudal entregado por la válvula. En el caso de que sea una bomba de velocidad variable, se caracterizará la señal para conseguir dicha relación lineal.

Control a dos elementos

El diseño del control a dos elementos se muestra en la Figura 3-20. En ella puede observarse el típico control feedback más feedforward.

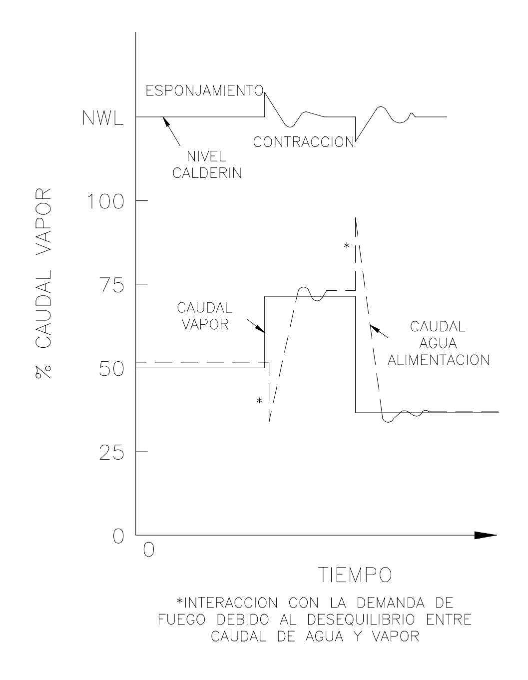


Figura 3-19. Interacción con el control de combustión

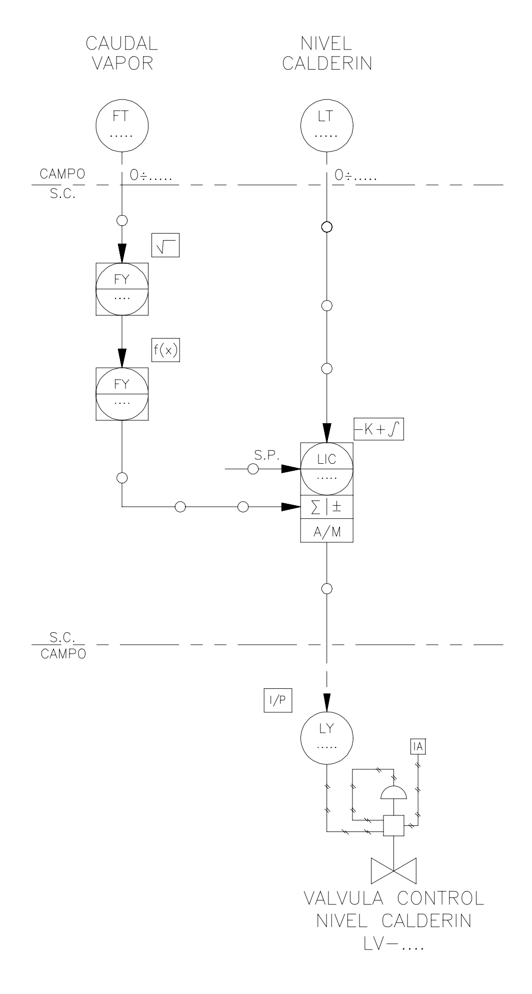


Figura 3-20. Control de nivel a dos elementos

El caudal de vapor es la señal índice que anticipa una variación en las necesidades de aportación de agua, de forma que se establecerá una relación entre éste y la posición de la válvula. Por otra parte, para el correcto funcionamiento de esta estrategia, es imprescindible que la relación entre la posición del elemento de control y el caudal aportado por éste no cambie y sea conocida, de forma que para unas condiciones de demanda de vapor dadas, sepamos en qué posición se ha de situar el elemento de control. Con este diseño, los objetivos expuestos anteriormente se cumplen, a excepción del de variaciones en la presión de suministro del agua de alimentación, puesto que esto haría que la relación entre posición y caudal variase.

Como hemos comentado, la respuesta deseada ante un cambio de carga es que se mantenga el caudal de agua hasta que el nivel empieza a retornar a su punto de trabajo, de forma que la cantidad de agua se ajusta suavemente al nuevo valor requerido.

Puesto que en este diseño ante un aumento en el caudal de vapor, éste pedirá más agua al tiempo que el nivel hará lo contrario, el ajuste adecuado de las ganancias de estas acciones nos permitirá evitar cambios inmediatos en la cantidad de agua y cumplir con el requisito expuesto anteriormente y mostrado en la Figura 3-16. Así, teniendo en cuenta la relación entre el vapor y la posición de la válvula, y la magnitud del esponjamiento ante un cambio en el caudal, se ajustará la ganancia del regulador de nivel para que su salida compense exactamente el incremento habido en aquél.

Como hemos comentado ya, aunque este diseño cumple con la mayoría de los objetivos requeridos para un correcto control del agua de alimentación, tiene un gran inconveniente al no ser capaz de absorber las modificaciones en la presión de suministro. El efecto que la variación de la presión de suministro produce queda reflejado en la Figura 3-21. Esto conduce a que el nivel desarrolla una compensación para mantener la relación agua-vapor. Cuando la presión en el agua de alimentación es variable, o existen otros motivos que hagan la relación entre la posición del elemento de control y el caudal aportado impredecible, es necesario usar un control a tres elementos.

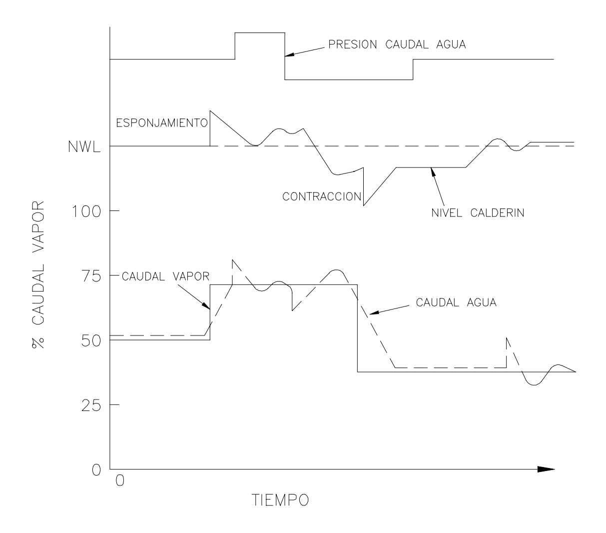


Figura 3-21. Efecto de la presión de suministro en dos elementos

Control a tres elementos

Hemos visto que en el control a dos elementos se utilizaban el nivel y el caudal de vapor. Para conseguir un control de tres elementos añadiremos la medida del caudal de agua de alimentación. Con ello, solucionaremos los problemas planteados con anterioridad sobre la necesidad de repetibilidad en el elemento final. Hay diversas formas de configurar un control a tres elementos. Aunque la más extendida es la mostrada en la Figura 3-22, podemos ver otra alternativa en la Figura 3-23.

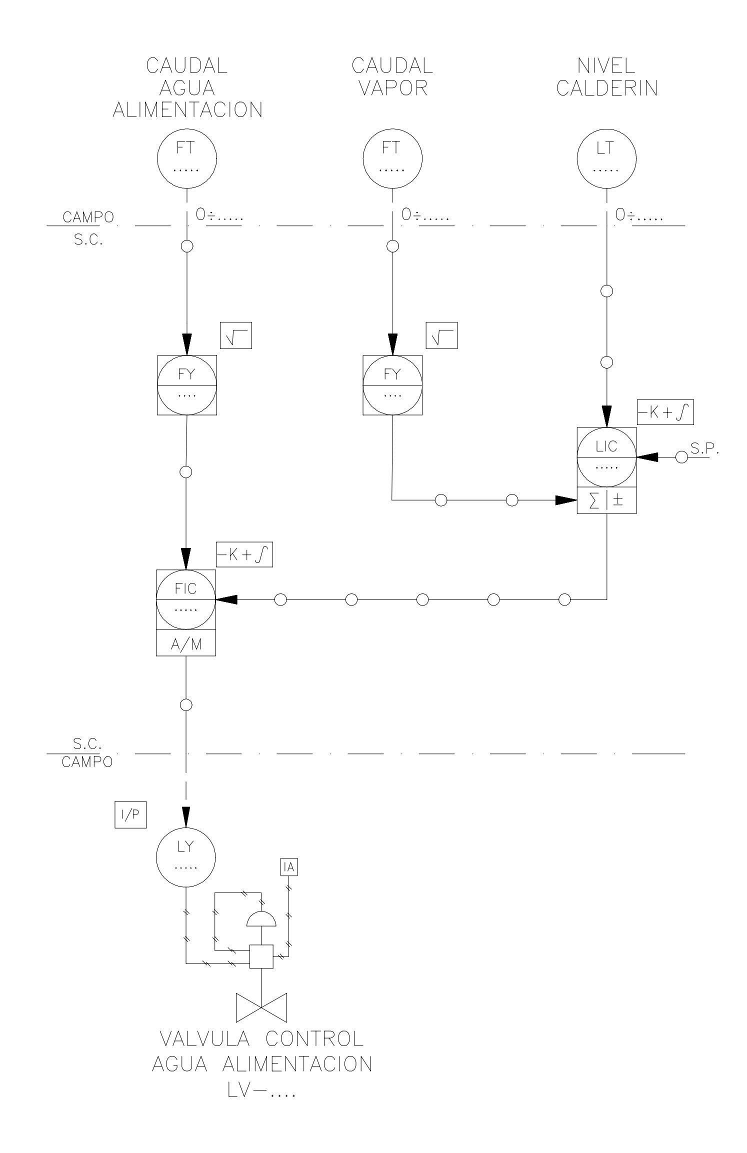


Figura 3-22. Control de nivel a tres elementos

La primera alternativa surge directamente del control a dos elementos. La señal que se enviaba al elemento de control, se usa ahora como consigna de un regulador de caudal en cascada, eliminándose la influencia de la presión de suministro. La segunda alternativa incluye también un regulador en cascada, pero

en este caso la salida del regulador de nivel marcará las necesidades de exceso o defecto de agua con relación al vapor, siendo la diferencia entre los caudales de éstos la variable de proceso del regulador de caudal.

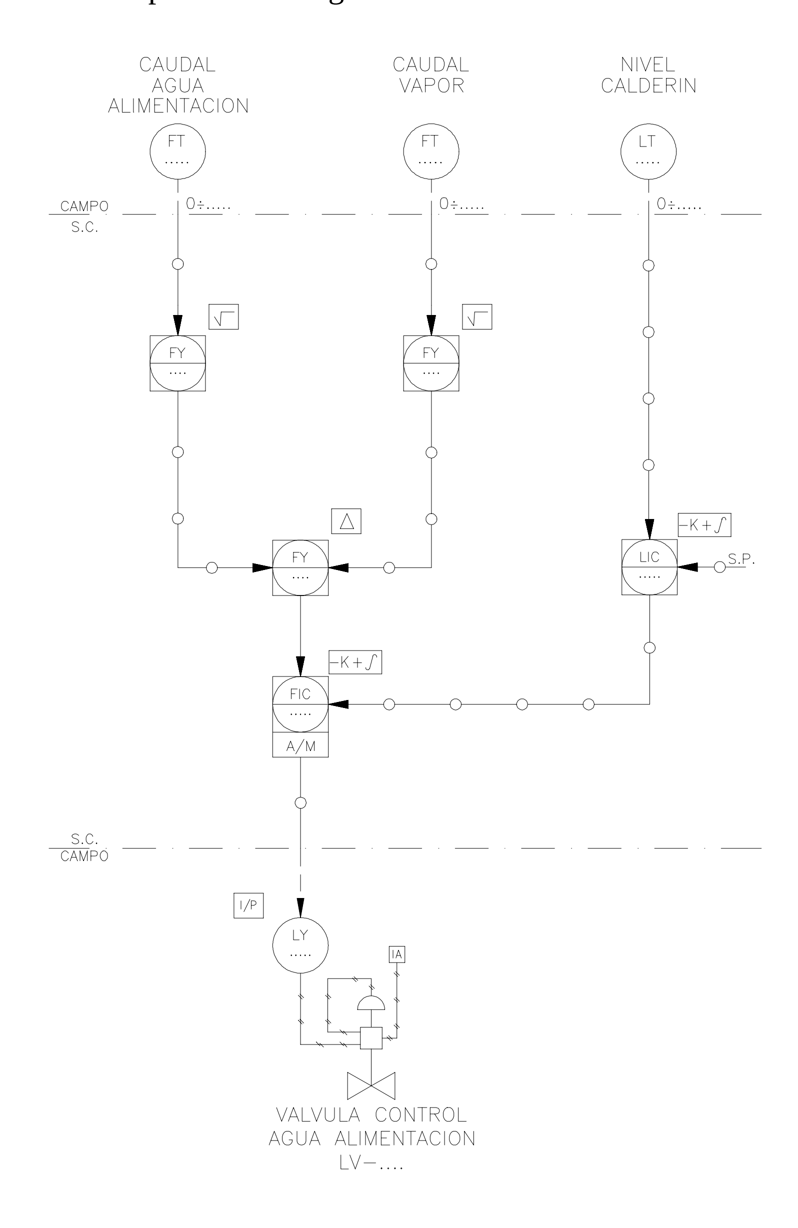


Figura 3-23. Alternativa control de nivel a tres elementos

Las dos configuraciones vistas pueden presentar problemas a bajas cargas por las limitaciones de las medidas de caudal. Una solución muy extendida para este problema, es la conmutación del control de agua de alimentación de uno a tres elementos de forma automática a partir de un caudal mínimo de vapor que suele estar entorno al 20%, valor para el cual las medidas son más fiables (Figura 3-24).

En el ajuste del lazo típico de tres elementos se seguirán las pautas indicadas anteriormente en el de dos para el ajuste del regulador de nivel y el caudal de vapor. El ajuste del regulador de caudal se hará mediante el procedimiento habitual para cualquier lazo de este tipo.

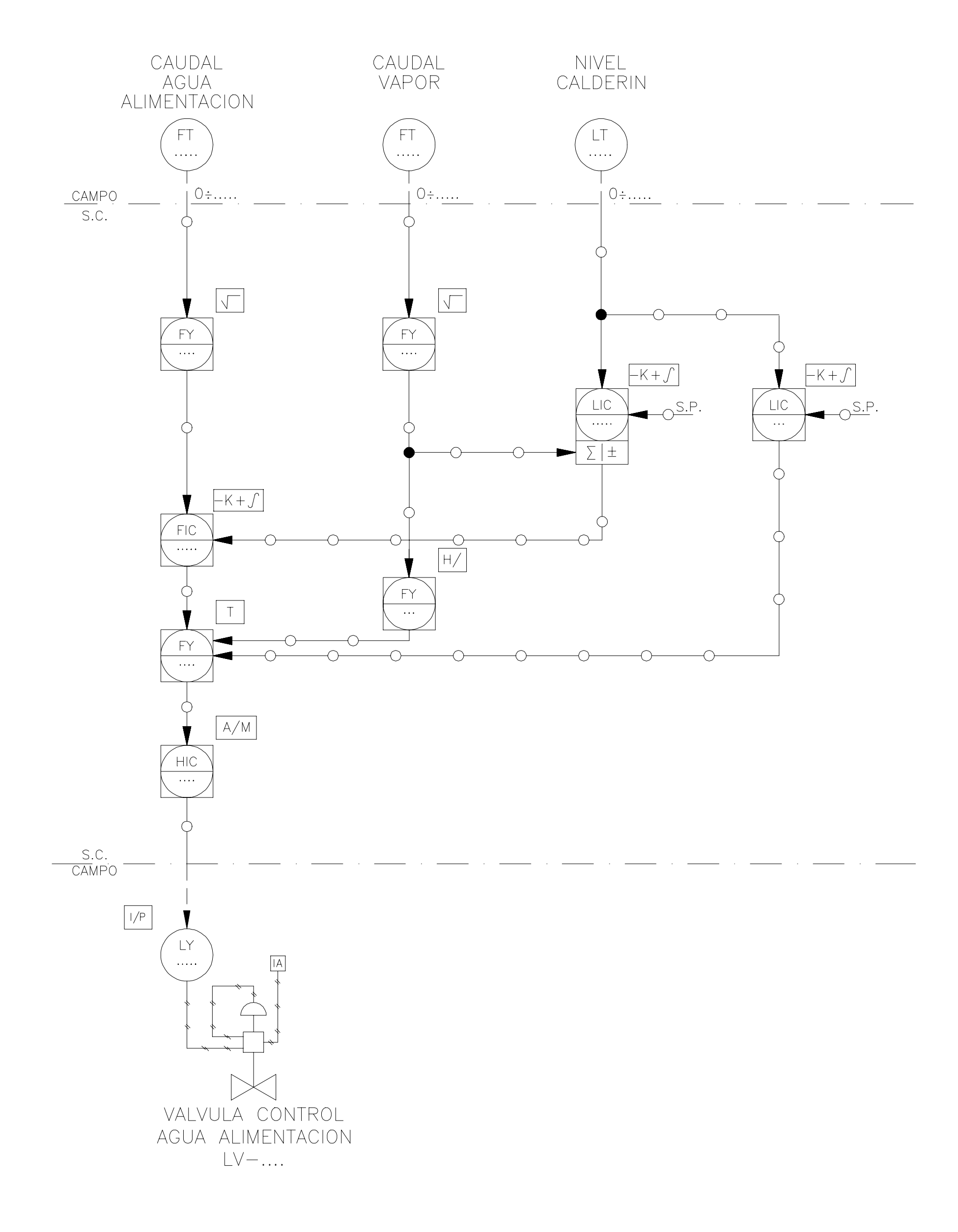


Figura 3-24. Control a uno y tres elementos

Adecuadamente ajustado, el funcionamiento de un control de nivel a tres elementos debería tener una apariencia similar a la de la Figura 3-25.

Como se observa, las variaciones en la presión del agua de alimentación son absorbidas por la acción del regulador secundario. Cuando estas variaciones sean de un rango tan importante que puedan complicar el ajuste de dicho regulador secundario, sería adecuado modificar la ganancia de éste en función de la presión del suministro para conseguir las mismas respuestas en caudal para las distintas condiciones de presión. Esto nos incluiría un cuarto elemento en el lazo como se muestra en la Figura 3-26.

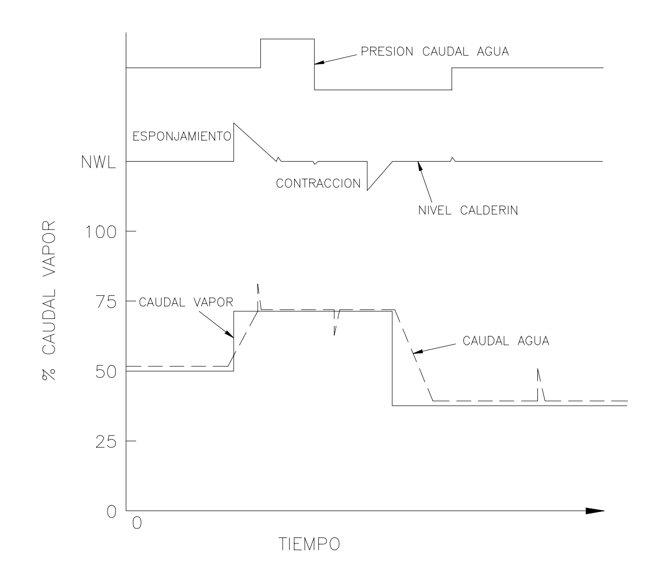


Figura 3-25. Respuesta del control de tres elementos

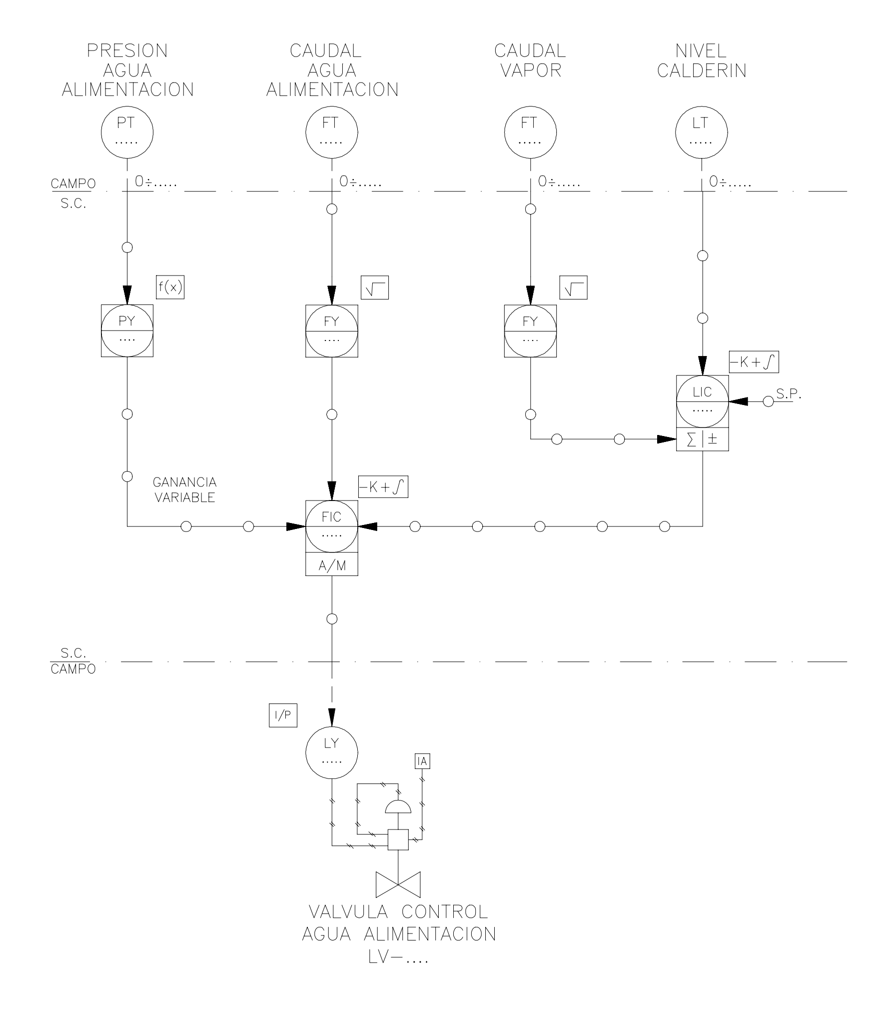


Figura 3-26. Ganancia variable por presión de suministro

Otra posible causa para la utilización de un cuarto elemento en el lazo, es el caso en que la purga continua de la caldera pueda tener una magnitud relevante con relación al caudal de vapor. Este hecho generaría la introducción de un desajuste permanente en el regulador de nivel, que compensaría la desviación entre las medidas de caudal. Para evitarlo se introducirá el caudal de purga como se indica en la Figura 3-27.

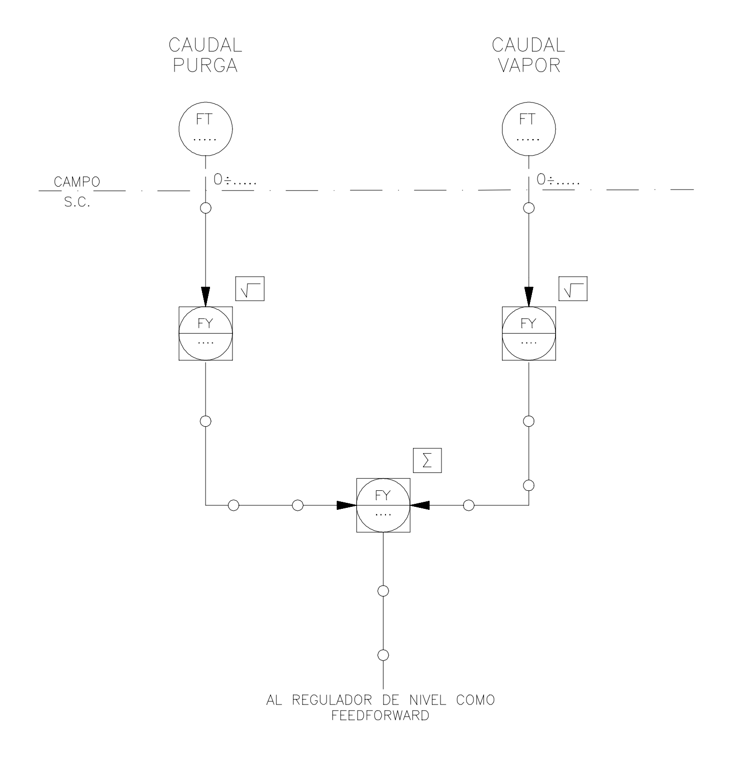


Figura 3-27. Inclusión del caudal de purga

En calderas en las que los cambios de carga son muy rápidos, se puede afinar el equilibrio agua-vapor mediante el uso de la presión del calderín. El equilibrio agua-vapor que hemos visto, está basado en la medida de vapor principal que sale de la caldera. Esta medida no considera lógicamente el vapor generado o sustraído a la caldera, que contribuye al aumento o disminución de la presión. Sin embargo, la generación de este vapor conlleva un consumo de agua. Este vapor se puede indicar mediante la derivada de la presión del calderín como se muestra en la Figura 3-28.

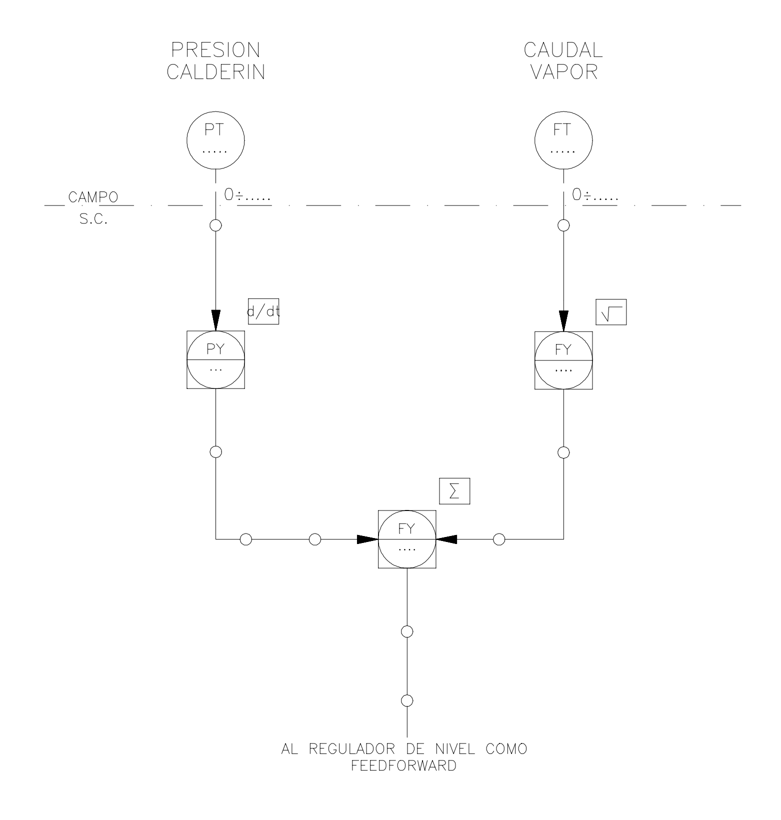


Figura 3-28. Alternativa a la medida de caudal de vapor

Una variación de este diseño se utilizará en el caso de que la caldera opere en presión deslizante o variable. La densidad del agua en el calderín varía con la variación de presión y por lo tanto la relación entre la derivada de la presión del calderín y el caudal de vapor expuesta anteriormente queda también modificada. Para tener esto en cuenta se puede multiplicar la derivada por el cuadrado de la presión de forma que la relación se mantiene para el rango de presión de operación (Figura 3-29).

La operación con presión variable también modifica la densidad de la mezcla agua vapor en circulación por la caldera. Dicha circunstancia puede modificar de forma notable el comportamiento de la caldera en cuanto a sus reacciones de esponjamiento y contracción, por lo que pudiera ser necesario el reajuste de la ganancia del controlador de nivel de acuerdo con la presión de operación.

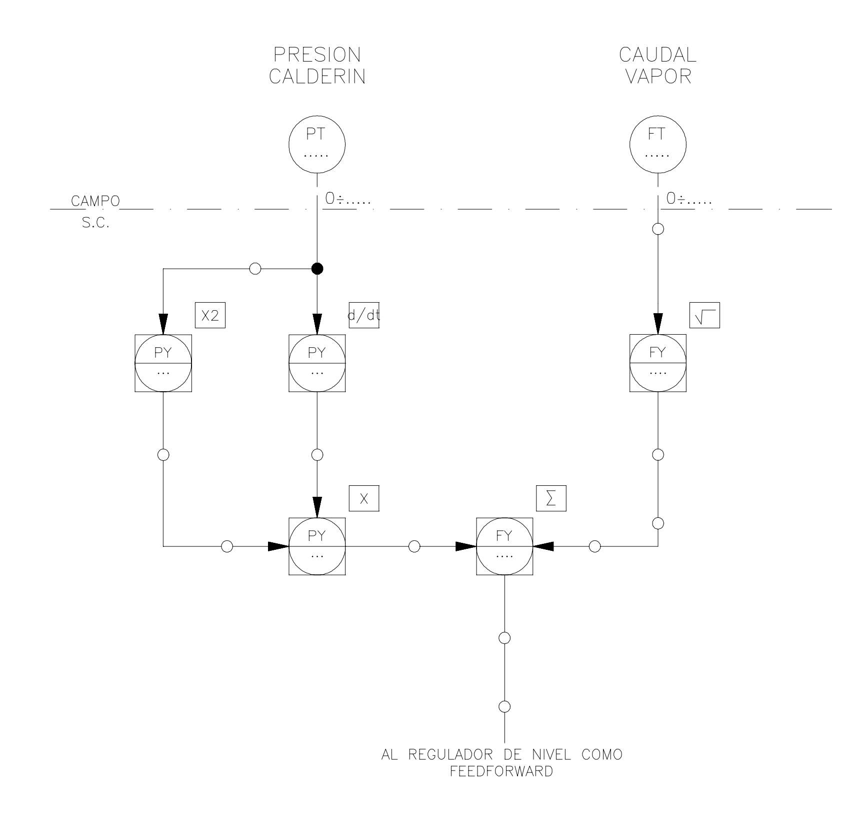


Figura 3-29. Alternativa para presión deslizante

Enclavamientos

En el control a tres elementos, cuando el controlador secundario está en manual o en modo local (si existe) el primario debe estar en manual. Otra opción es mantener el controlador primario en modo seguimiento de forma que su salida sea igual a la variable de proceso del secundario, de forma que el paso a automático o a consigna remota del secundario haga entrar en control directamente al primario.

Si el primario está en manual el secundario se pasará o no a manual dependiendo si se permite o no el control con consigna local en el secundario.

En el caso del control mixto de uno y tres elementos, además de lo indicado anteriormente se debe enclavar el cambio automático de los dos modos de operación con la señal de caudal de vapor > 20%. La salida al elemento de control del modo no seleccionado debe estar en modo seguimiento de la que está seleccionada para que los cambios entre ambos modos de operación se produzcan sin saltos. Cuando es la salida de la regulación de tres elementos la que está en modo seguimiento, la salida de su regulador primario estará siguiendo a la variable de proceso del secundario, para que todo el lazo esté preparado para entrar en control.

3.4 Control de temperatura del vapor

Objetivo

Existen calderas cuya producción es vapor saturado, de tal forma que la temperatura del vapor viene marcada por la presión de operación, pues son variables directamente relacionadas. También existen calderas en las que el vapor es sobrecalentado de forma ligera para su mejor conducción o consumo, pero que se dimensionan de forma que las modificaciones en la temperatura del vapor no sean importantes de cara al consumidor. Sin embargo, hay gran cantidad de calderas en las que el vapor generado ha de estar a una cierta temperatura, que asegure el correcto funcionamiento de sus consumidores. En estos casos, en los que normalmente el grado de sobrecalentamiento es mayor, la imposibilidad de diseñar la caldera para que en todas las cargas requeridas produzca el vapor a la temperatura deseada, obliga a controlar ésta de forma que se mantenga dentro de los márgenes de operación deseados.

Filosofía del control

Existen distintos métodos de control de la temperatura del vapor, algunos basados en mecanismos de control de la parte gases y otros en la parte de agua de la caldera. Los primeros son típicos de calderas de centrales térmicas y su uso en calderas industriales es poco frecuente por lo que no nos detendremos en ellos. Los segundos, más extendidos, consisten en atemperar el vapor bien mediante la inyección directa de agua (Figura 3-30), bien mediante el uso de un intercambiador de calor agua-vapor (Figura 3-31). El primer método desde un punto de vista de control tendrá una constante de tiempo menor y su respuesta será más rápida. Sin embargo, al introducir agua en el vapor la calidad de éste vendrá modificada por aquélla. En el segundo caso esta posible contaminación del vapor no existe, pero la respuesta del sistema y por tanto su constante de tiempo será mucho mayor, con los inconvenientes que esto puede originar al proceso y al ajuste del sistema de control.

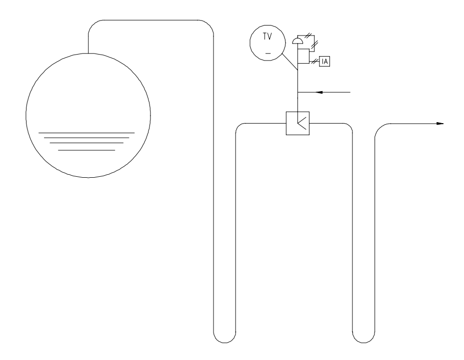


Figura 3-30. Atemperación por spray

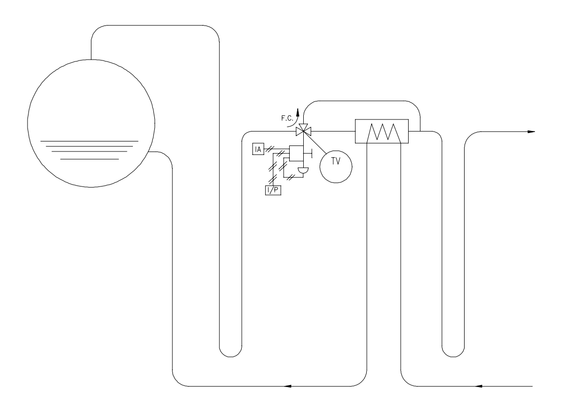


Figura 3-31. Atemperación por intercambiador de calor

Control a un elemento

En pequeñas calderas en donde la carga permanece constante o con cambios lentos, o en aquellas en las que la cantidad de sobrecalentamiento no se modifica de forma demasiado notable con la carga, el uso de un control PI simple como el de la Figura 3-32 puede dar resultados satisfactorios.

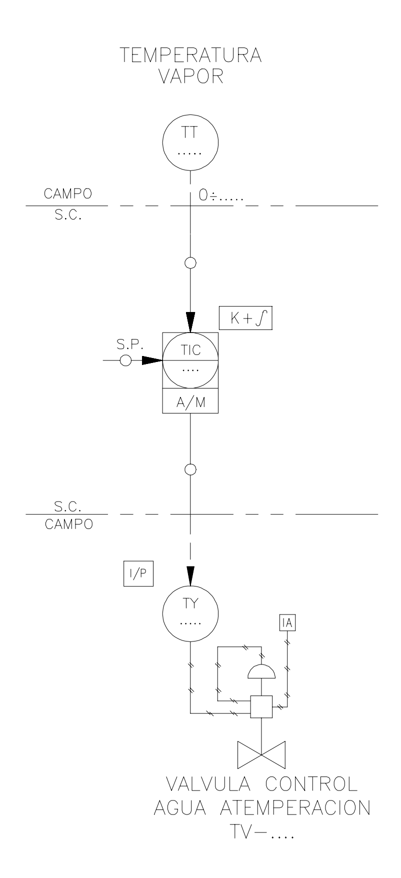


Figura 3-32. Control de temperatura de vapor a un elemento

Si la temperatura sube la válvula abre para aportar más agua, y viceversa.

Sin embargo, en la mayoría de las instalaciones este tipo de control no será suficiente para mantener la temperatura del vapor en los márgenes exigidos.

Control a dos elementos

Este tipo de diseño se basa en un control feedforward más feedback. El caudal de aire de combustión nos da la magnitud de la demanda de fuego en la caldera, así como del volumen de gases que se envían al sobrecalentador, por lo que será un buen índice que nos anticipe la posición de la válvula de spray. La temperatura del vapor será lógicamente la variable realimentada (Figura 3-33), cuyo error corregirá la posición demandada.

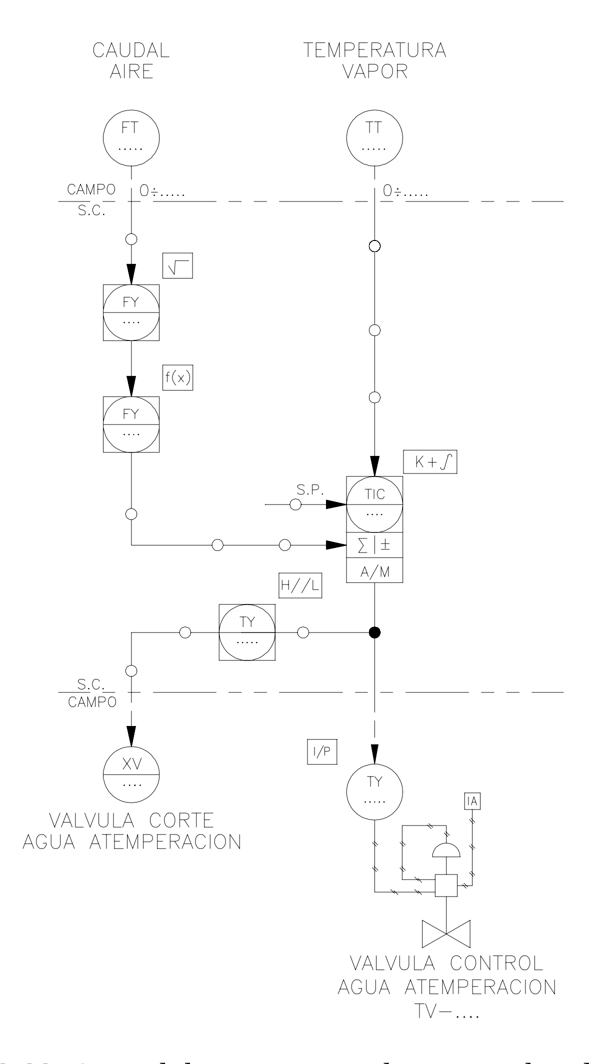


Figura 3-33. Control de temperatura de vapor a dos elementos

Si por algún motivo el caudal de aire no se pudiera utilizar como índice, el caudal de vapor puede ser utilizado en su lugar aunque en situaciones transitorias pudiera no ser tan indicativo para el control de la temperatura del vapor.

Una alternativa a este control de dos elementos es la basada en un control en cascada como el de la Figura 3-34.

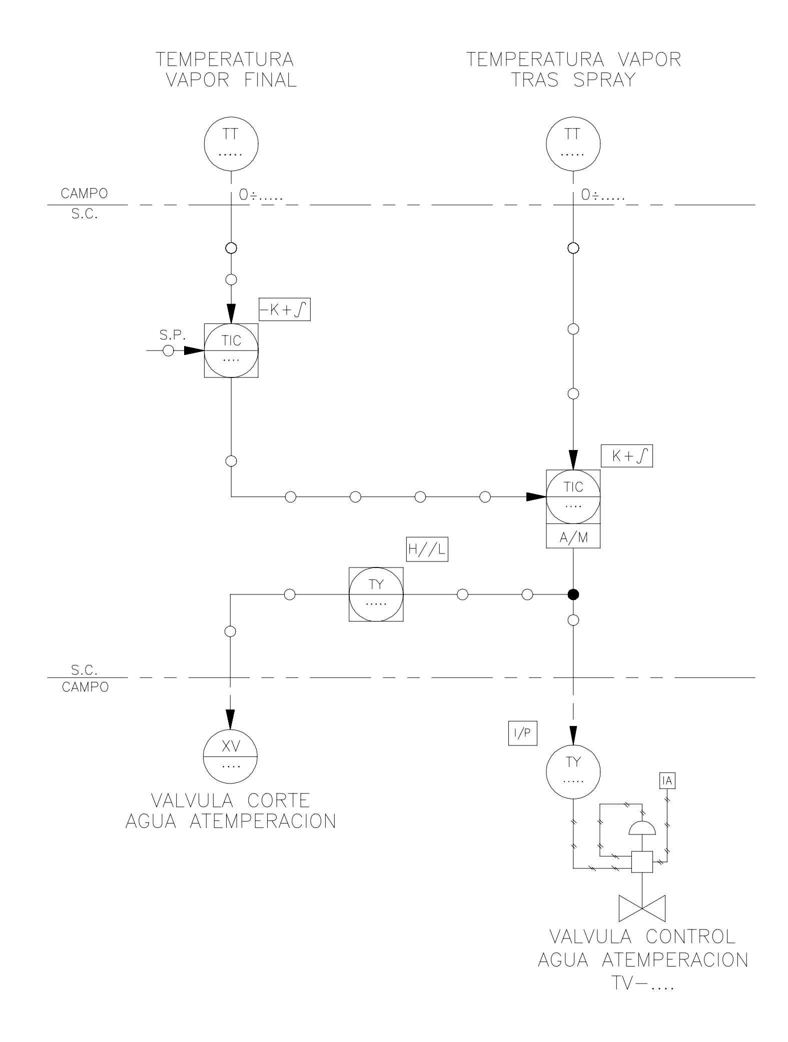


Figura 3-34. Control en cascada de temperatura de vapor a dos elementos

En este control, la temperatura final de vapor se utiliza como variable de proceso del regulador primario y una medición de la temperatura a la salida del spray se utiliza como la variable de proceso del regulador secundario. Con esta nueva medición, las modificaciones en el caudal de atemperación tendrán un reflejo más inmediato en el control por lo que el ajuste del regulador secundario puede hacerse para proporcionar una respuesta bastante rápida. Como en todo lazo en cascada el ajuste del regulador primario deberá ser más lento, para dar tiempo a la correcta regulación en el secundario y evitar que se sature.

Como la atemperación no es necesaria normalmente hasta una determinada carga de caldera, suele ser habitual que exista una válvula de corte aguas arriba de la válvula de control para evitar que ésta trabaje como tal, sobre todo si la presión en

la línea es alta. Los comandos de abrir y cerrar esta válvula para que trabaje de forma automática se obtienen de la salida a la válvula de control, de forma que cuando se empieza a producir demanda de apertura se da la orden de abrir, y cuando cesa la de cerrar.

Se podría decir como idea general, que la elección de la primera estrategia vendrá condicionada por la existencia o no de un índice adecuado para el correcto posicionamiento de la válvula de control. En aquellas instalaciones en las que este índice no está disponible o la atemperación es similar en todo el rango de operación, la segunda opción suele ser aconsejable.

Control a tres elementos

Como hemos comentado un handicap para el uso del control en cascada puede ser el que exista una gran diferencia en las posiciones de la válvula de control para las distintas cargas de caldera. Este problema se puede paliar mediante la inclusión del caudal de aire de combustión como tercer elemento en este lazo (Figura 3-35).

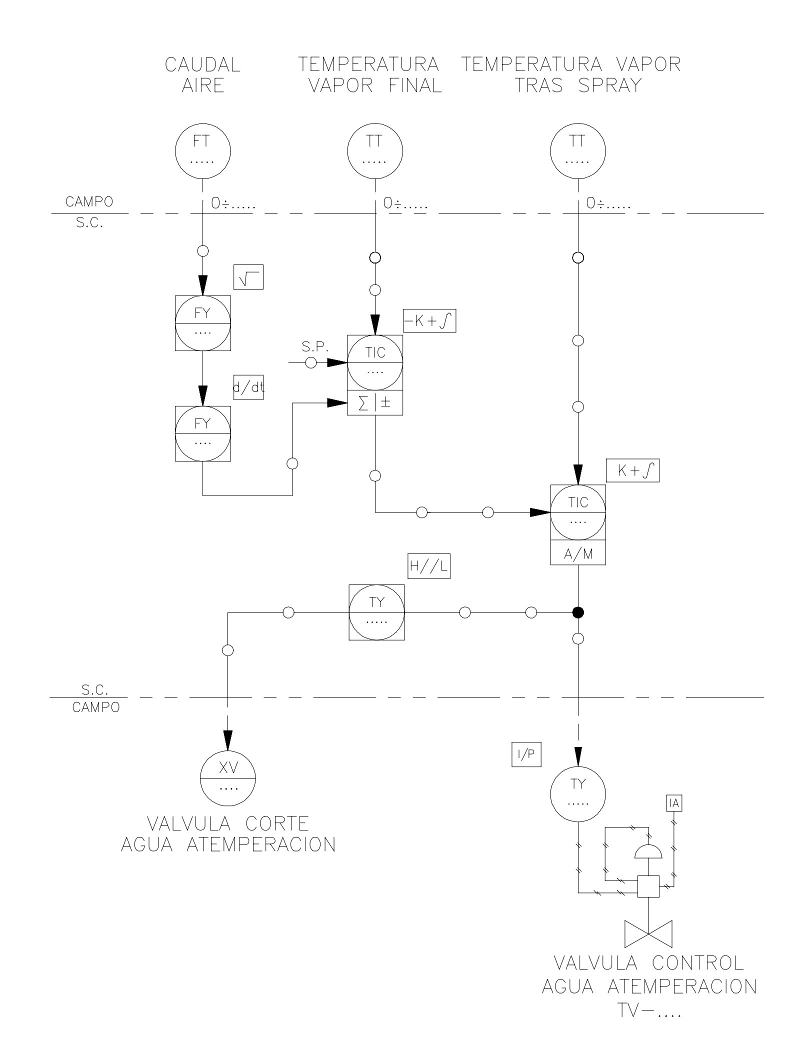


Figura 3-35. Control de temperatura de vapor a tres elementos

La derivada del caudal de aire se utilizará como señal anticipativa para modificar la posición de la válvula ante los cambios de carga, mientras que en situaciones de régimen permanente no tendrá influencia.

Otra posibilidad del diseño con tres elementos es la de la Figura 3-36.

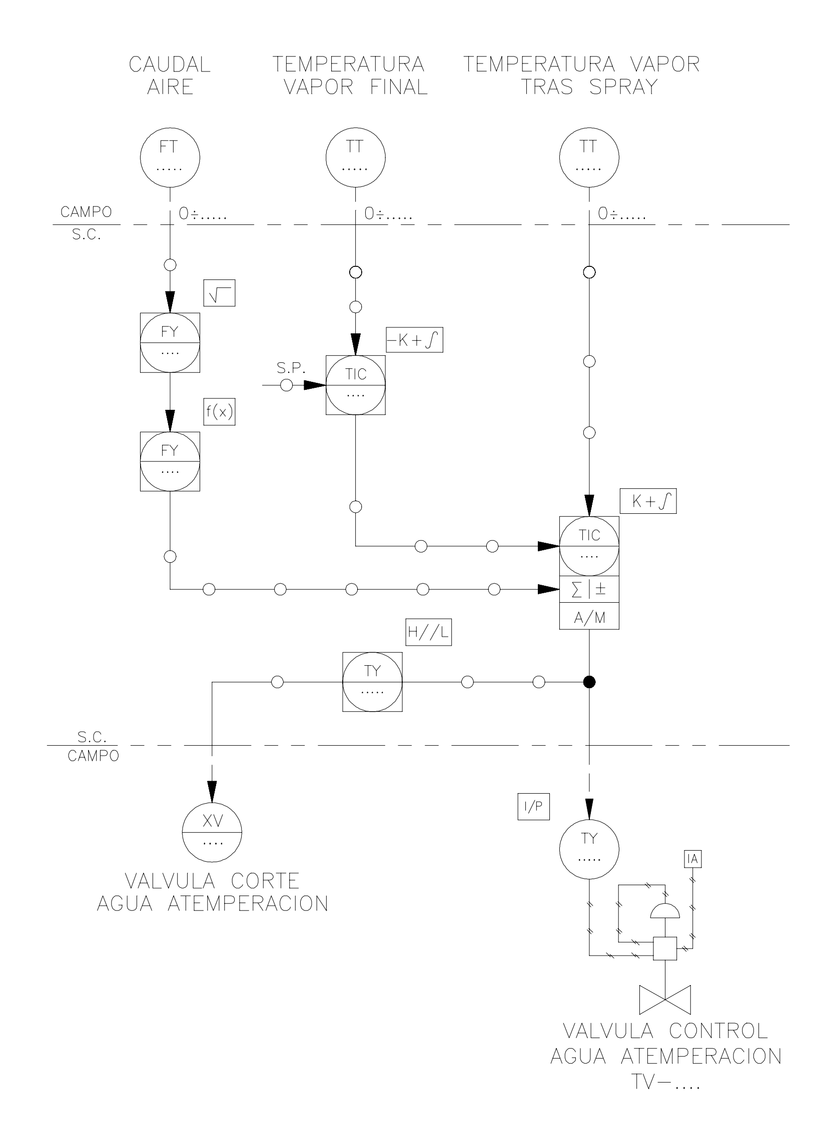


Figura 3-36. Alternativa de control de temperatura de vapor a tres elementos

Esta configuración lo que hace es aunar los dos diseños expuesto para el control con dos elementos, de forma que el caudal de aire se utiliza como índice de la posición de la válvula y se corrige por los errores en temperatura, ya sean en la final o en la de salida del spray.

Las consideraciones dadas para el ajuste del control de dos elementos son evidentemente válidas para éste.

Cuando se dispone de la medida del caudal del spray se puede usar éste como elemento adicional para un control de caudal (Figura 3-37) que asegure el correcto

funcionamiento de los índices independientemente de la repetibilidad del elemento de control, como ya se vio en el control de nivel (ver apartado 3.3)

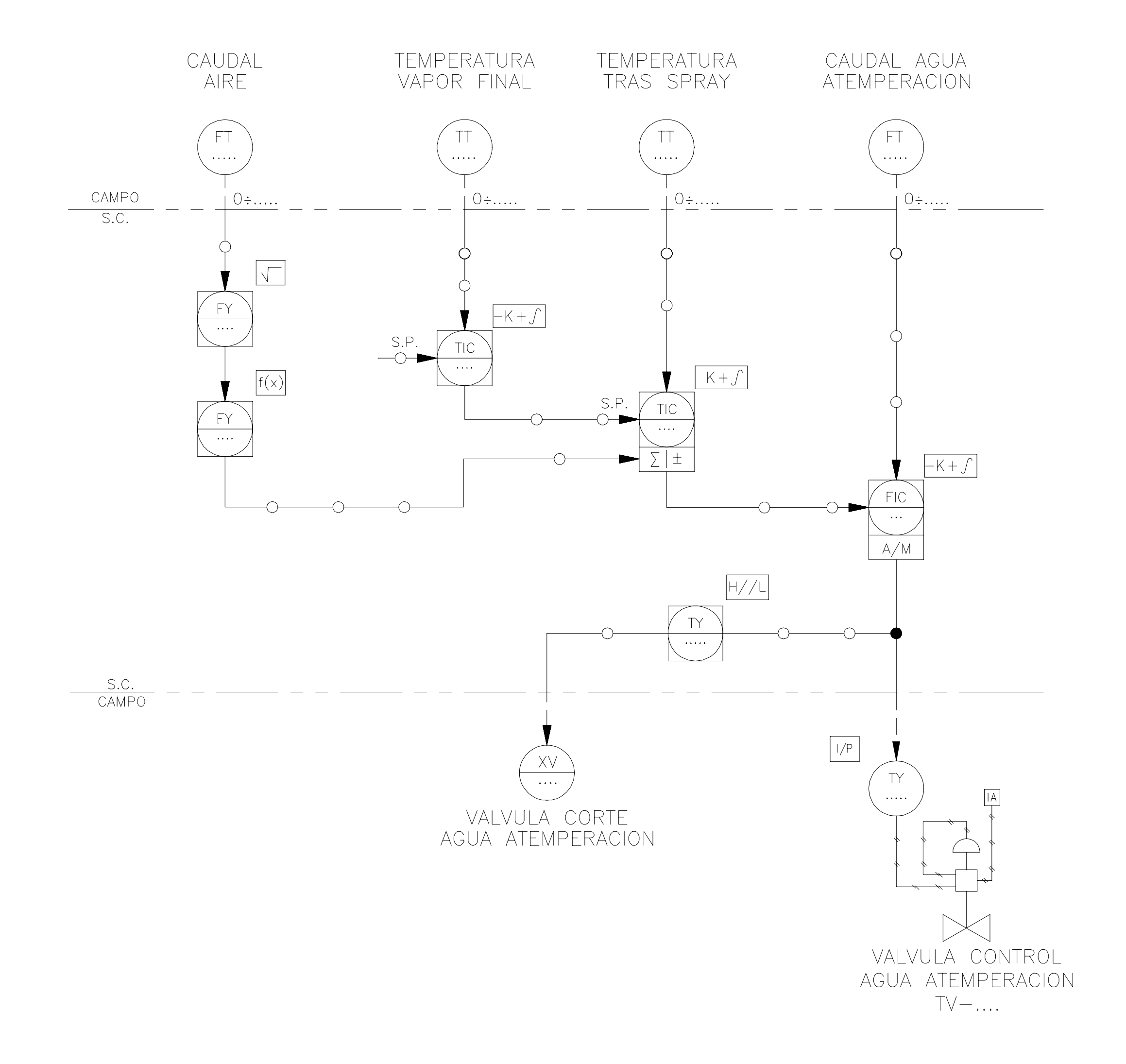


Figura 3-37. Control de temperatura de vapor con caudal de spray

Obviamente el colocar en cascada tres reguladores implica complicaciones de ajuste, además de la inclusión de demoras no deseadas en el lazo, que hacen de este diseño solo aconsejable en situaciones particulares.

Enclavamientos

En los controles en cascada, cuando el controlador secundario está en manual o en modo local (si existe) el primario debe estar en manual. Otra opción es mantener el controlador primario en modo seguimiento de forma que su salida sea igual a la variable de proceso del secundario, de forma que el paso a automático o a consigna remota del secundario haga entrar en control directamente al primario.

Si el primario está en manual el secundario se pasará o no a manual dependiendo si se permite o no el control con consigna local en el secundario.

Se dará orden de apertura y cierre de la válvula de corte cuando la demanda supere un 3% y se reduzca por debajo de un 1% respectivamente.

3.5 Control de la demanda

Objetivo

El objetivo de este lazo es generar una señal de demanda de carga para los quemadores que mantenga el equilibrio entre la energía entregada y suministrada por el sistema. Al mantener este equilibrio se asegurara una producción de vapor en las condiciones de operación necesarias para todo el rango de funcionamiento.

Filosofía del control

La demanda de una caldera la generan los usuarios del vapor. Cuando los consumidores abren sus válvulas demandando más vapor (energía), el aumento en el caudal provoca que la presión de éste caiga. La magnitud de la caída de la presión depende del volumen de agua, del de vapor, de la magnitud del cambio en la demanda y de la demanda en sí. El colector de vapor es el punto en el que se establece el equilibrio entre la energía demandada por los usuarios del sistema y la energía entregada al sistema por el combustible y el aire.

Para un caudal de vapor dado, que la presión en el colector permanezca constante indicará que existe un equilibrio entre la energía suministrada y la demandada. Por otra parte, podremos decir que existe una relación 1:1 entre el caudal de vapor y de energía sólo cuando las condiciones de presión y temperatura del vapor no sufren variaciones considerables. Sobre estas premisas se puede establecer lo siguiente:

- La demanda de vapor = caudal de vapor + error en presión.
- El suministro = combustible + aire + agua + el cambio de energía almacenada en el sistema.
- El consumo = vapor de los consumidores.
- El punto de balance será el colector de vapor.
- La presión se mantendrá en su consigna cuando el consumo sea igual al suministro siendo constante la energía almacenada.
- Un aumento en la presión significará que el suministro es superior al consumo.
- Un descenso en la presión significará que el consumo es superior al suministro.

Control a un elemento

La estrategia de control más simple para generar la demanda de carga es un lazo PI simple como el que se muestra en la Figura 3-38.

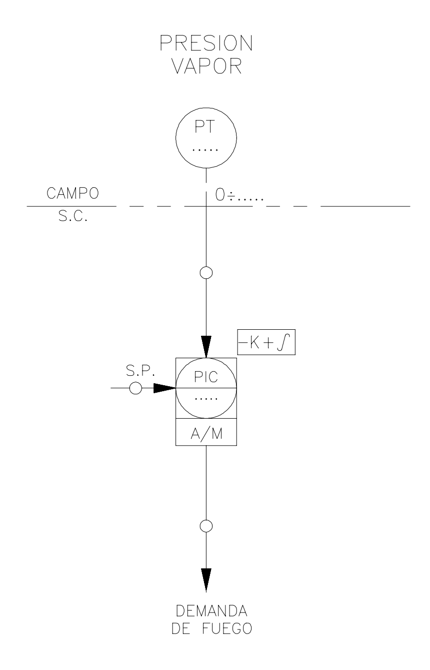


Figura 3-38. Control de demanda de carga

La variable de proceso del controlador será normalmente la presión de vapor en el colector, pues como se ha dicho es indicativa del equilibrio de energía, aunque en algunas instalaciones ésta puede ser sustituida por el caudal de vapor. El objetivo de este cambio es que la caldera suministre una cantidad de vapor fija mientras otras calderas al mismo colector mantienen la presión. También se puede establecer un control alternativo, basado bien en caudal bien en presión, mediante la implementación de una función de transferencia manipulable por el operador (Figura 3-39).

La salida del controlador es lo que se llama demanda de carga o de fuego y su correcta generación es de vital importancia al ser ésta la señal master que usarán los controles de aire y combustible. Por este motivo, a este regulador se le suele llamar Master. Por la importancia que tiene sobre el rendimiento y el buen funcionamiento de la caldera, se suelen usar otras configuraciones más complejas que proporcionan señales de carga más precisas, lo que conlleva mejoras en el control de la presión del vapor.

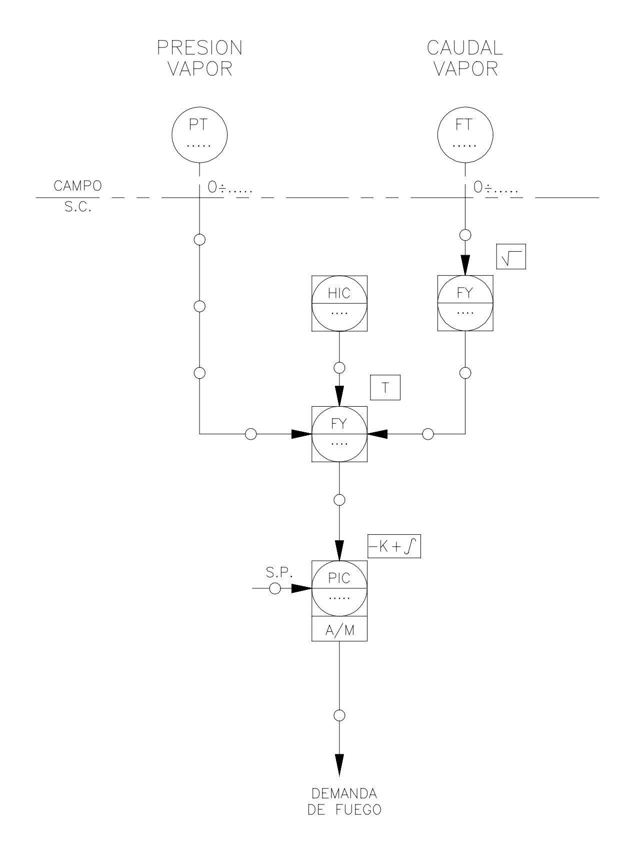


Figura 3-39. Control de demanda alternativo caudal/presión

Control a dos elementos

El uso de una estrategia de control feedforward más feedback es muy corriente. El diseño más habitual en este tipo de estrategia se muestra en la Figura 3-40.

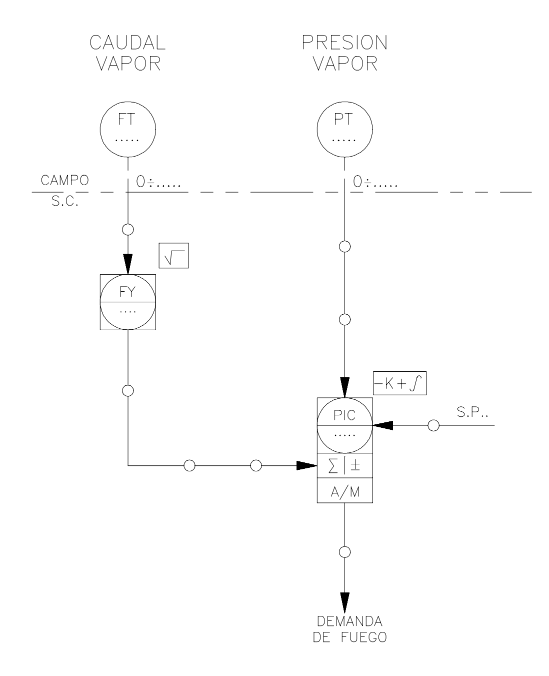


Figura 3-40. Control de demanda a dos elementos

El caudal de vapor se usa como señal índice de la demanda de carga y marcará directamente la demanda de combustible necesaria en cada momento, de forma que ante una variación en el caudal la demanda de carga se situará en el correcto punto de funcionamiento para las nuevas condiciones. Como resultado, cualquier variación en la demanda de vapor tendrá una respuesta inmediata en la aportación de combustible al sistema. Esto producirá una pérdida de energía almacenada menor, que consecuentemente se traducirá en una menor pérdida de presión del sistema.

La presión del vapor se usa como realimentación del regulador master, cuya salida proporciona el necesario exceso/defecto de fuego para el ajuste de la energía almacenada, modificada durante los cambios en la carga. Puesto que el peso en la señal de demanda de carga de la salida del regulador no tiene esencialmente efecto en condiciones de régimen permanente, el controlador será de naturaleza principalmente proporcional, aunque la imposibilidad de obtener un índice perfecto obligará al uso de una pequeña acción integral.

Nótese, que el caudal de vapor debe ser la suma ponderada, de acuerdo con su capacidad, de los caudales de vapor de todas las calderas involucradas en el control, de forma que la señal represente correctamente la necesidad total de energía.

Una alternativa a este esquema es aquélla en que las señales de caudal y presión de vapor intercambian sus funciones como se muestra en la Figura 3-41.

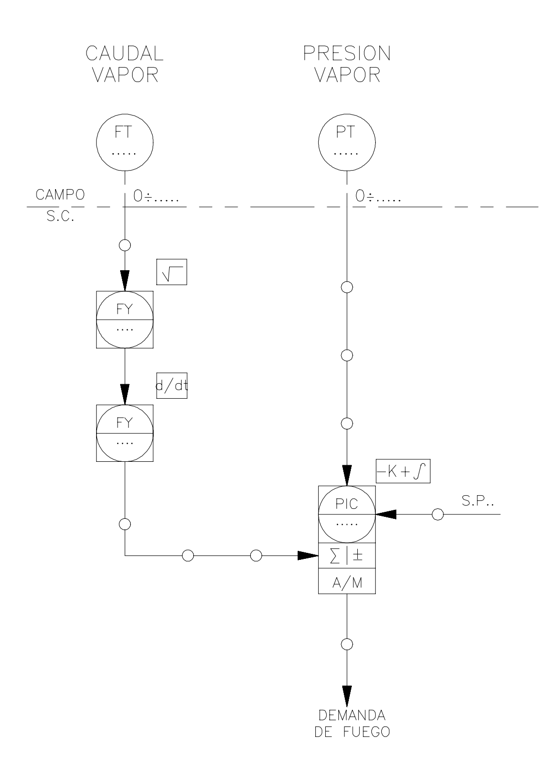


Figura 3-41. Alternativa de control de demanda a dos elementos

En este caso la derivada de la señal de caudal se ajustará para proporcionar el exceso/defecto de fuego deseado en los transitorios, mientras que el regulador de presión proporcionará la señal necesaria durante el régimen permanente.

Aunque la elección de un diseño u otro depende del usuario, cabría indicar que esta segunda alternativa sería más adecuada en los casos en que exista una caída de presión alta entre el colector y la caldera.

En estos casos, ante un aumento en la demanda de vapor, la caída de presión en el colector será aún mayor debido al déficit de presión sufrido también en la caldera. Por un lado existirá una caída de presión debida a que el consumidor desea más vapor, y por otro lado existirá un déficit de presión en la caldera, pues para poder entregar el nuevo caudal será necesaria una presión superior en ella.

Una tercera alternativa basada en la primera sería la representada en la Figura 3-42.

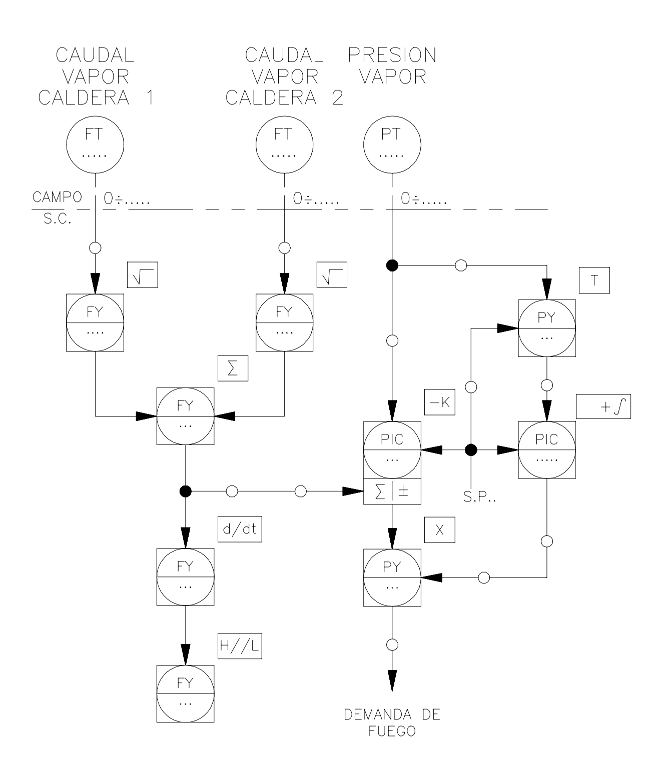


Figura 3-42. Control de demanda con compensación automática

Esta nueva alternativa añade al diseño una compensación automática para las variaciones en el poder calorífico de los combustibles. Si en condiciones de régimen permanente la aportación de calor a la caldera aumenta, la presión de vapor empezaría a aumentar. Como consecuencia, el caudal aumentaría haciendo que la señal de anticipo aumentara y por lo tanto inhabilitando la corrección del regulador de presión, e incluso superando ésta y demandando erróneamente más combustible. Con este diseño, la integral del error en presión corregiría la señal de demanda de forma que la acción correctora del regulador de presión consigue el efecto deseado, estableciéndose de forma dinámica una nueva relación entre el

caudal de vapor y la demanda de fuego. Cuando el error en presión se debe en realidad a modificaciones en la demanda de vapor esta acción correctora queda anulada. La derivada del caudal servirá como interruptor automático para que la corrección actúe o no.

Reparto de cargas entre múltiples calderas

La demanda de carga generada por el control master debe incrementar o decrementar la demanda de combustible y de aire para todas las calderas conectadas a un colector. La forma más sencilla de repartir las cargas entre las distintas calderas, es la de dejar al operador decidir sobre dicho reparto. Para ello, la demanda master de carga se envía a una estación auto/manual que incorpora la función bías, realizando estas estaciones las funciones de master en cada caldera. De esta forma, el operador puede fijar la demanda de cualquier caldera en manual o dejar que ésta sea gobernada por el master de planta, y balancear las cargas entre las distintas calderas con la ayuda de los bías (Figura 3-43).

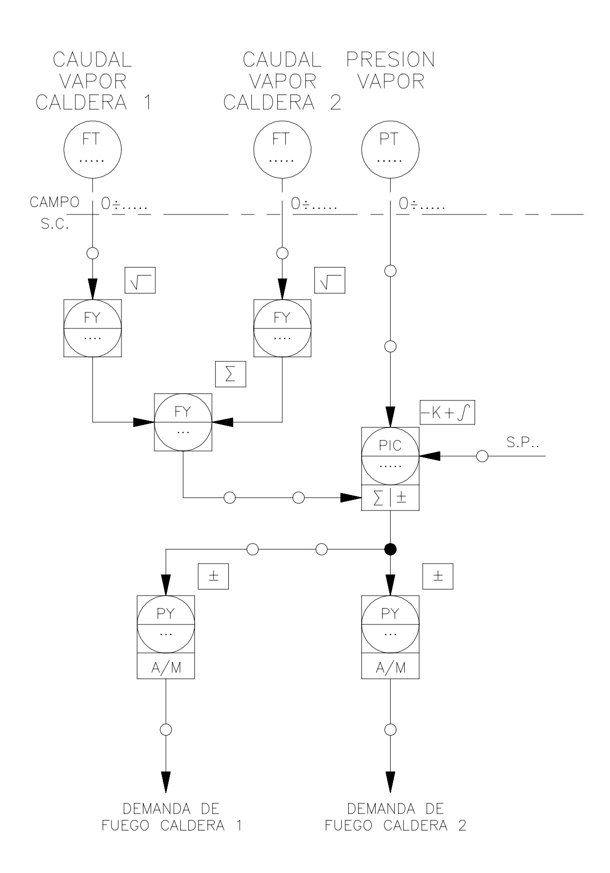


Figura 3-43. Control de demanda para múltiples calderas

Con esta disposición existen diversos inconvenientes:

– El master de caldera se ajusta para el supuesto de que todas las calderas van a trabajar en automático. Si se añadieran o eliminarán calderas del sistema obligaría a un reajuste de los parámetros del regulador para mantener la ganancia adecuada en el sistema.

– Si alguna caldera que está trabajando en manual modifica su carga, el sistema no responderá bajando carga en las otras hasta que no se produzca una variación en la presión, lo cual conlleva, además de tiempo, desviaciones no deseadas. El caso extremo de este ejemplo sería la puesta en servicio o disparo de una de las calderas.

Para solucionar estos problemas se puede introducir una variante como la que se muestra en la Figura 3-44. En ella, se incorpora un regulador de compensación cuya consigna será la demanda de carga. Adicionalmente, a la salida de las estaciones se añade un sumador cuya salida será la suma ponderada de las cargas de cada caldera, de acuerdo con los pesos relativos de cada una de sus producciones. La salida del sumador será la variable de proceso del regulador de compensación.

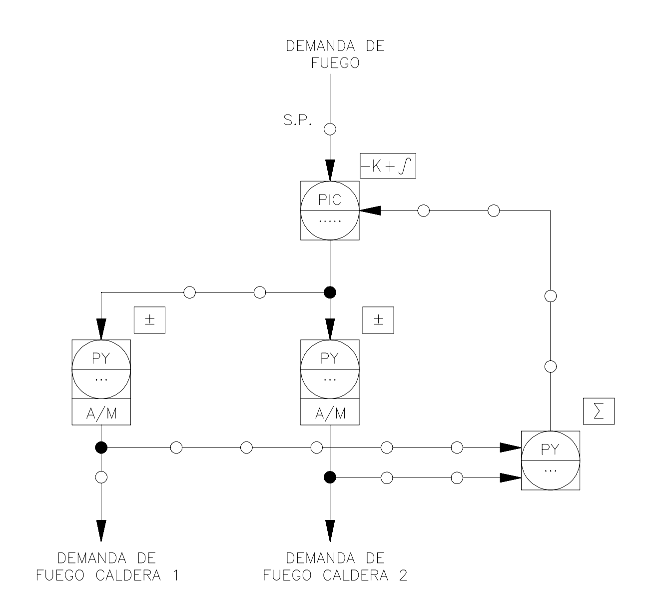


Figura 3-44. Compensación automática de la demanda

Con este diseño se consigue una compensación automática independientemente del número y tamaño de las calderas. Por otra parte, si una caldera está en manual y modifica su demanda, inmediatamente la salida del sumador variará proporcionalmente, provocando que la salida del regulador se reajuste a la nueva situación inmediatamente. Si una caldera es disparada, forzando la salida de su estación auto/manual a 0 % se conseguirá la compensación automática e inmediata del sistema ante un disparo.

En algunas instalaciones se puede preferir no dejar en manos del operador la decisión de la distribución de cargas entre las calderas. Un método muy sencillo de hacer esta distribución en automático se muestra en la Figura 3-45.

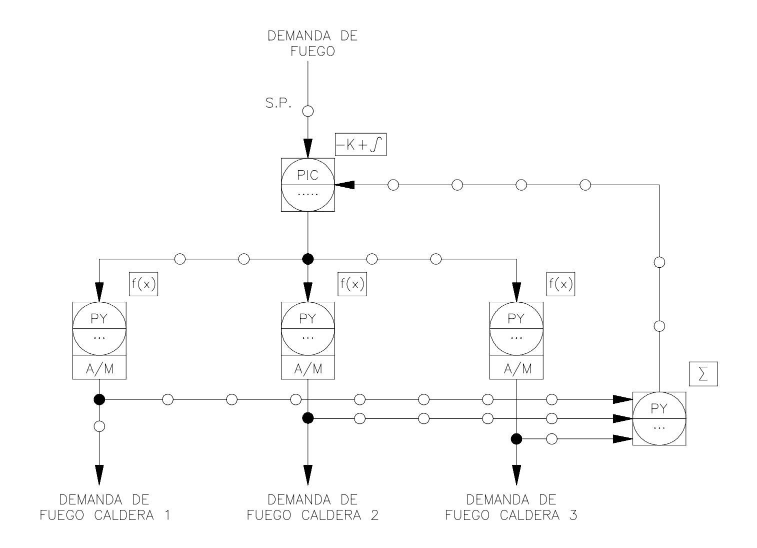


Figura 3-45. Distribución automática de carga entre calderas

En este diseño se incluye un generador de función antes de las estaciones auto/manuales. Este generador de función se establecerá en base a una serie de pruebas efectuadas que definen que distribución de cargas es la más correcta para las distintas producciones.

Si se dispone de algún tipo de cálculo que permita evaluar el costo de la generación de la energía para cada una, y que puede ser utilizado en línea, se puede trabajar con la disposición de la Figura 3-46, en donde este cálculo será utilizado como señal de bías, positivo o negativo, para distribuir la carga de las calderas de acuerdo con dicho costo.

Limitaciones de carga

Aunque son casos más habituales en calderas de centrales para la generación de energía, puede darse también en este tipo de calderas la circunstancia de que existan una serie equipos que trabajen en grupos y no estén dimensionados para dar por si solos la carga nominal. Tal puede ser el caso de dos ventiladores del 50 o 60%, de dos bombas de agua, etc.

En estos casos, a fin de que el sistema de control impida que la demanda de fuego sea superior a aquélla que se puede alcanzar con los equipos en operación, se debe limitar la señal de demanda al máximo valor disponible como se ha mostrado para la caldera 1 en la Figura 3-46.

Enclavamientos

Cuando todas las estaciones auto/manuales están en manual el controlador master y el de compensación estarán en modo seguimiento, de forma que ante el cambio a automático de una de las estaciones el sistema entre directamente en control.

Cuando se establece un límite por disponibilidad de carga los controles aguas arriba individuales de cada caldera deben estar en modo seguimiento.

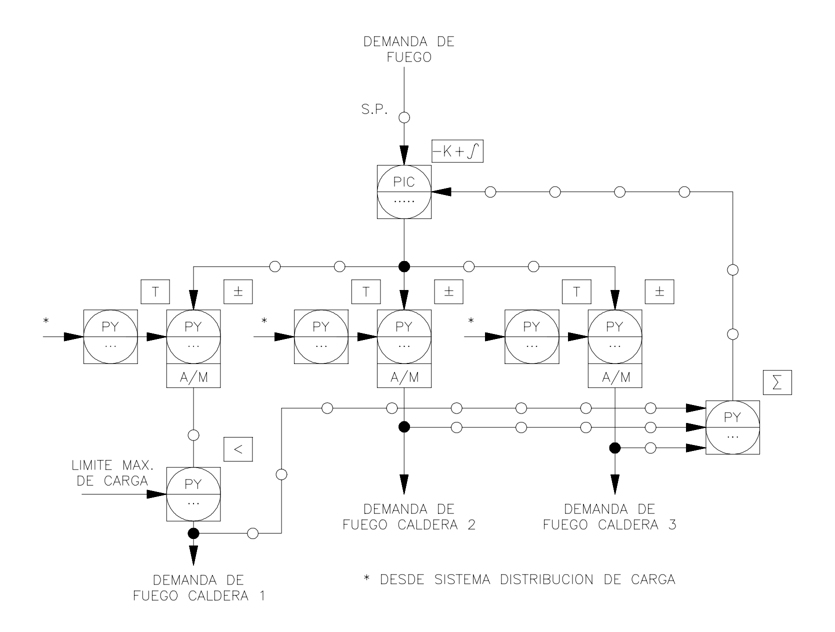


Figura 3-46. Distribución de carga entre calderas basada en el costo

3.6 Control de combustión

Objetivo

De acuerdo con los requerimientos de la NFPA 8502, un sistema de control de combustión debe cumplir, entre otros, con los siguientes requisitos de diseño[1]:

- El control de combustión debe mantener la relación aire-combustible en un rango que asegure una combustión continua y una llama estable en todas las condiciones de operación.
- La demanda de combustible no debe incrementar nunca el caudal de combustible por encima del de aire.
- La demanda de combustible no debe nunca exceder la capacidad de los ventiladores en servicio.
- Cuando se queman múltiples combustibles, se totalizarán basándose en sus poderes caloríficos.
- La aportación de calor a una zona o quemador no debe exceder los límites especificados.

[1] Al objeto de permitir sistemas de control sencillos para calderas pequeñas, aunque son recomendables, no todos estos requisitos aplicaran a calderas de un quemador.

Bajo estas premisas, los objetivos principales del control de combustión son los siguientes:

- Mantener los caudales de aire y combustible de acuerdo con la demanda de carga de la caldera, para entregar al sistema la energía requerida para el suministro del caudal de vapor deseado, manteniendo el equilibrio energético.

- Mantener una relación entre los caudales de aire y combustible que asegure que existe oxígeno suficiente para que la combustión se produzca de forma completa y segura.

- Mantener, dentro de los requisitos del punto anterior, un exceso de aire mínimo que permita conseguir los mayores niveles de eficacia posibles.

- Mantener las demandas a los distintos quemadores dentro de los límites de su capacidad de operación, asegurando con ello el correcto funcionamiento de éstos.

Filosofía del control

Existen muchos diseños posibles para el control de la combustión, en gran parte debido a la gran variedad de combustibles que se pueden utilizar en las calderas. Los diseños explicados de aquí en adelante estarán basados en el supuesto de que los combustibles sean del tipo gaseoso o líquido cuyo suministro a la caldera se hace mediante válvulas de control.

Los sistemas de control de la gran mayoría de las calderas actuales son controles analógicos que incluyen las medidas de todas las variables principales del proceso. Sin embargo, para pequeñas calderas, normalmente de un quemador, se pueden utilizar sistemas de control más simples.

Control por posicionamiento

Este tipo de control se basa en el posicionamiento de las válvulas de control y de la compuerta del ventilador de acuerdo con la demanda del regulador master. En este tipo de control no existen medidas ni de combustible ni de aire, sino que basándose en las mediciones realizadas durante la puesta en servicio del equipo se hacen los ajustes necesarios para fijar la posición de los equipos de acuerdo con la demanda.

La forma más sencilla de este tipo de control es usando un elemento de control (Single Point Positioning) manejado por el regulador master que rota un eje (jackshaft) que modifica las aperturas de las válvulas de control y de los álabes del ventilador (Figura 3-47) a los que está mecánicamente unido.

.

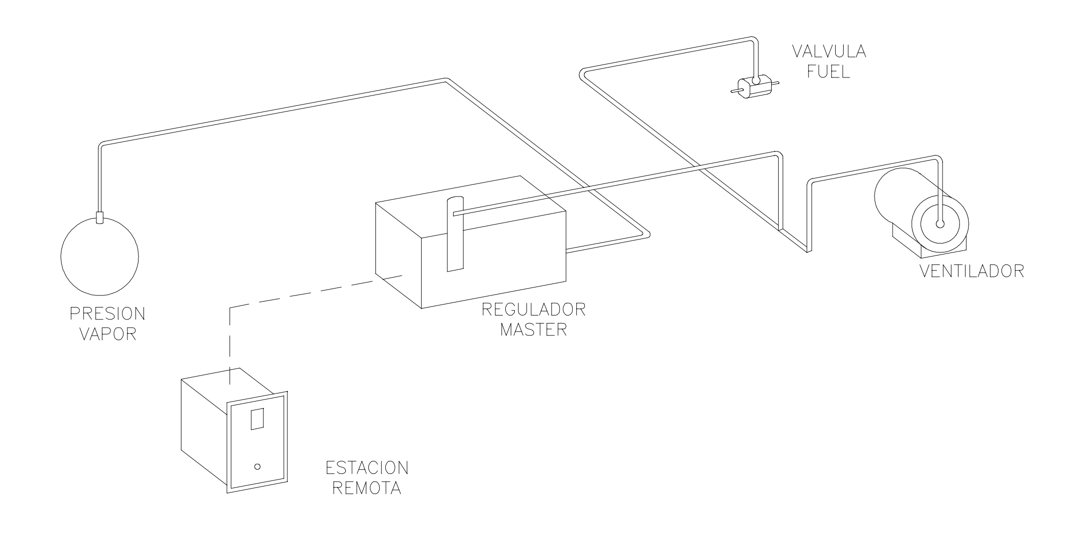


Figura 3-47. Control por posicionamiento (SPP)

El sistema se ajusta haciendo lineal la señal de demanda con la entrega de caudal de aire, al tiempo que el combustible se ajusta para coincidir con dicho aporte de aire.

En la Figura 3-48 se muestra otra forma de control por posicionamiento en la que no existe ya el enclavamiento mecánico, sino que se envían órdenes en paralelo (Parallel Postioning) a los actuadores del combustible y del aire. En este control se puede ajustar la relación entre el aire y combustible e incluso establecer una corrección por oxígeno (Figura 3-49).

Obviamente, este tipo de control tiene muchos inconvenientes. Las variaciones en la temperatura o presión de los combustibles o las variaciones en la temperatura, presión o humedad del aire, que conllevan distintos caudales para las mismas posiciones de válvula, producirían serias variaciones en la relación aire-combustible. Además la precisión del sistema al carecer de medidas es deficiente.

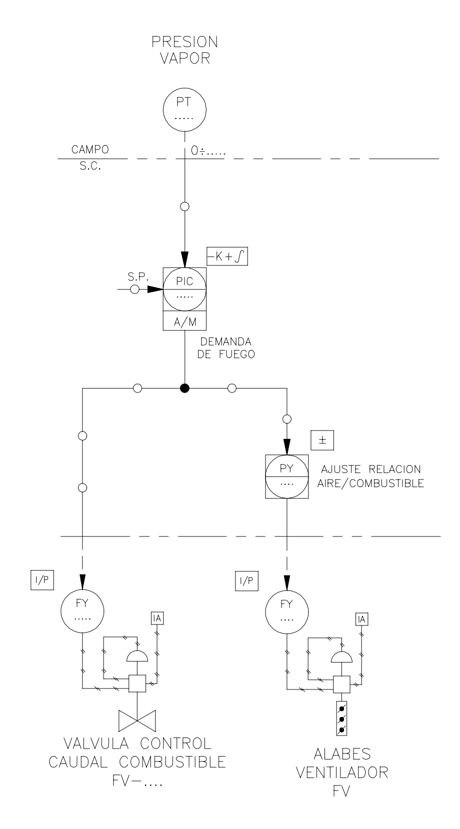


Figura 3-48. Control por posicionamiento en paralelo (PP)

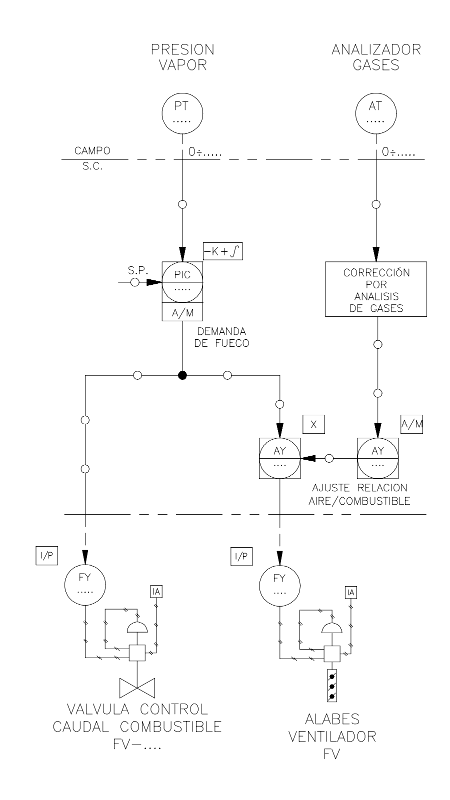


Figura 3-49. Control por posicionamiento en paralelo (PP)

Control realimentado

Estas deficiencias se resuelven utilizando un diseño (Figura 3-50) en el que las medidas del caudal de combustible y de aire se utilizan como realimentaciones para mantener dichas variables en sus puntos de consigna requeridos.

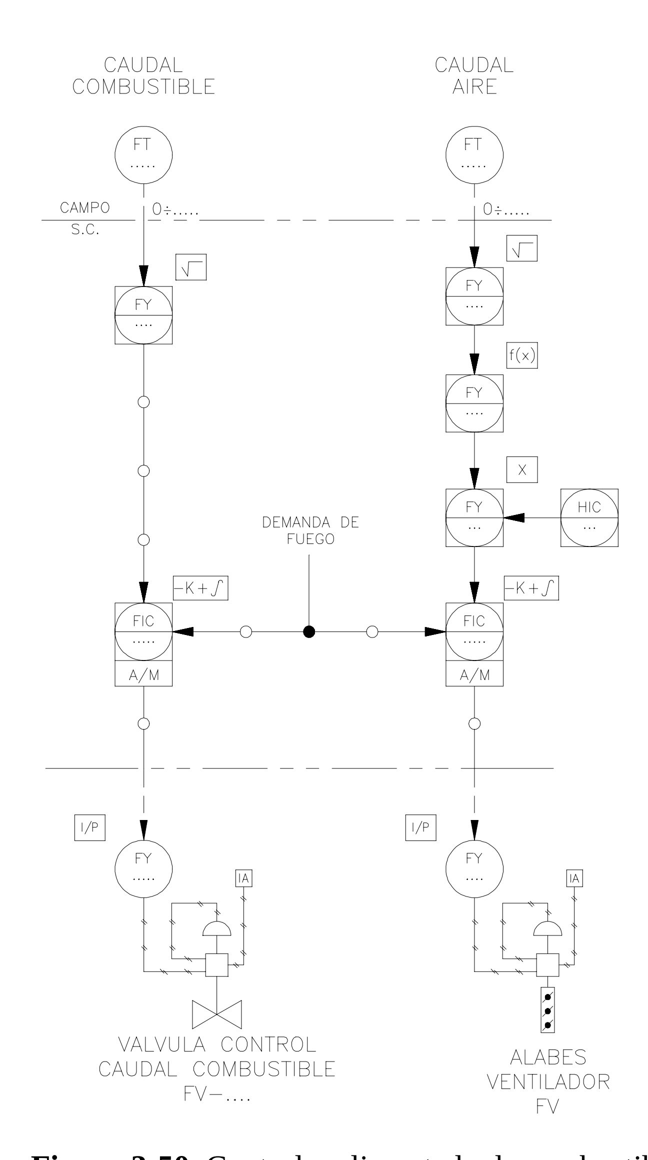


Figura 3-50. Control realimentado de combustible

Con este diseño la relación lineal necesaria entre el caudal de aire y combustible se hace en la medida del aire. Además se puede poner a disposición del operador una estación manual que le permita modificar la relación aire-combustible.

Otras variaciones de este diseño son las que se muestran en las Figura 3-51 y Figura 3-52. En la primera de ellas la demanda de carga se envía como consigna del regulador del caudal de aire y la salida de éste como consigna del de combustible. En la segunda se hace lo contrario, la señal de demanda se envía como consigna del regulador de combustible y la salida de éste como consigna del de aire.

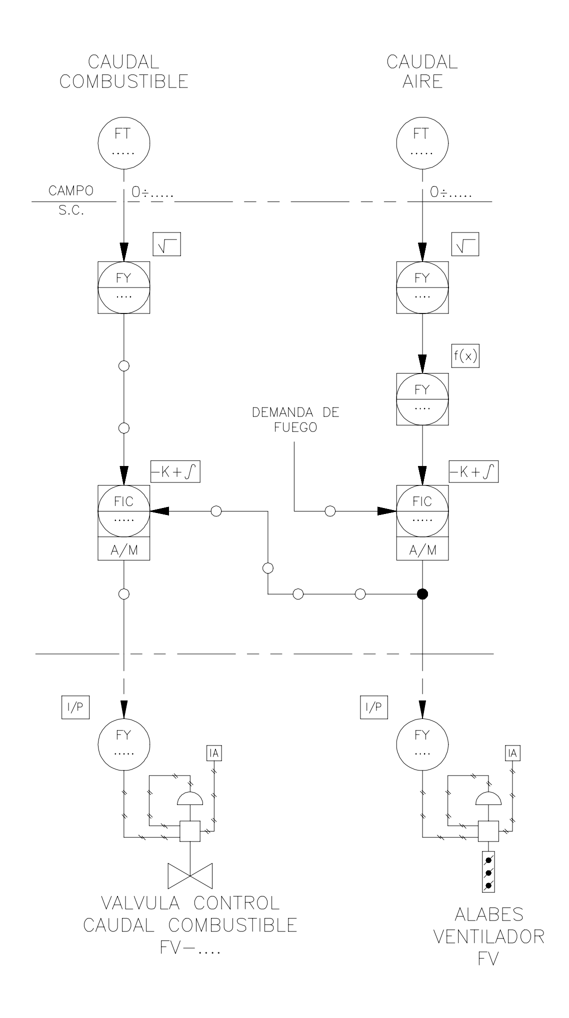


Figura 3-51. Control de combustión. Combustible sigue a aire

Sin embargo, estos diseños siguen siendo deficitarios desde un punto de vista de la seguridad, al no asegurar para todas las condiciones de operación la cantidad de aire suficiente para la correcta combustión.

Si por ejemplo existe un incremento en la demanda de carga, en el caso de la Figura 3-51, se aumentaría el aire y luego el combustible, pero en la Figura 3-52, aumentaría el combustible y luego el aire, lo cual obviamente es peligroso. Por el contrario, si existiese una bajada en la demanda, en la Figura 3-52 se bajaría primero el combustible y luego el aire, pero en la Figura 3-51, disminuiría antes el aire que el combustible, lo cual también es peligroso. Como se ve, un diseño en un caso y el otro en el contrario resultan peligrosos al poder reducirse la relación aire-combustible por debajo de su valor de seguridad. En el diseño de la Figura 3-50 ante cualquier fallo en el posicionamiento se podría producir esta situación.

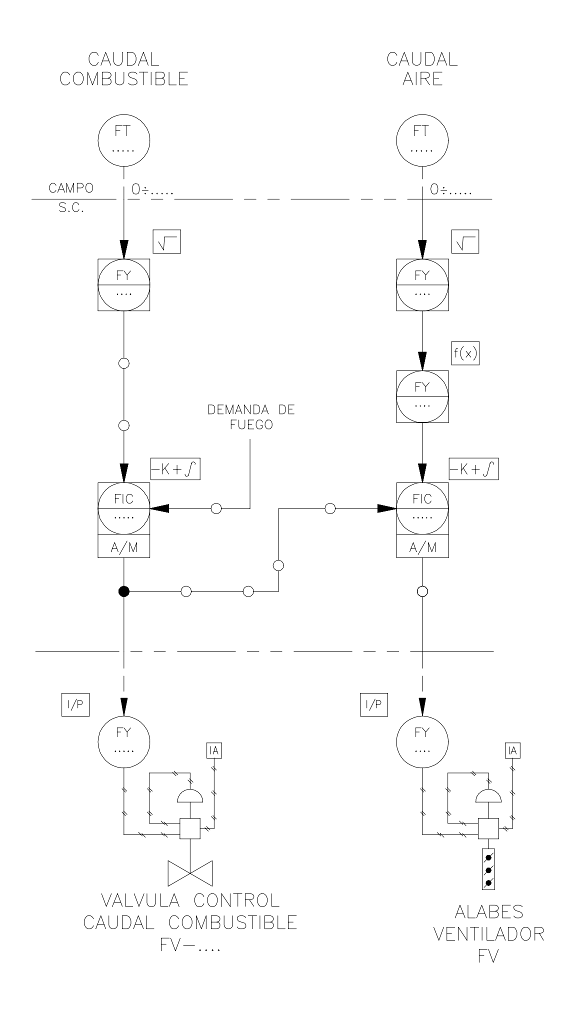


Figura 3-52. Control de combustión. Aire sigue a combustible

Con el fin de aumentar el nivel de seguridad en la relación aire-combustible y acabar con el problema expuesto se utiliza el diseño de la Figura 3-53 que se conoce normalmente como límites cruzados.

Con esta disposición, la demanda de carga de caldera se filtra a través de unos selectores de máxima y mínima, en donde es comparada con el caudal total de combustible y aire respectivamente. La salida del selector de máxima se envía como consigna del regulador de aire, y la del de mínima como consigna del de combustible. De este forma, ante un aumento en la demanda de carga, es el caudal de aire el que primero se incrementa y según lo va haciendo se incrementa el de combustible. Cuando por el contrario, se produce una disminución en la demanda de carga, es el caudal de combustible el que se reduce en primer lugar y el de aire lo va haciendo en la medida en que lo hace aquél. Igualmente, si por cualquier motivo se produce una disminución en el caudal de aire, o un aumento en el de combustible inesperado, los selectores actúan de forma que el caudal de aire se

ajusta inmediatamente. Así se asegura que en todo momento el caudal de aire existe, al menos, en la cantidad necesaria para asegurar una combustión completa.

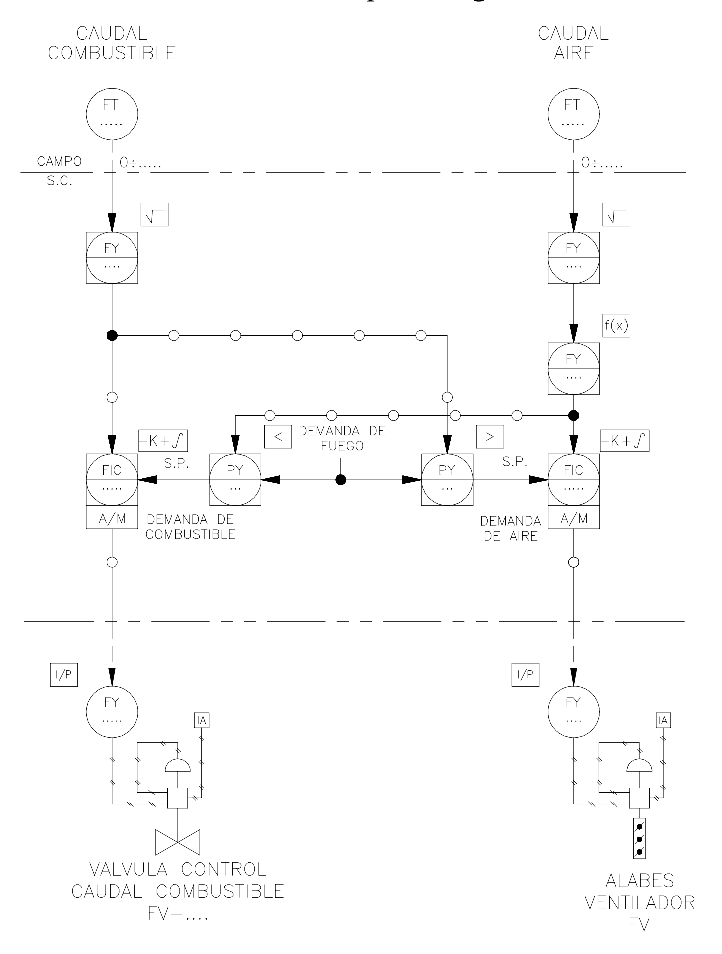


Figura 3-53. Control de combustión con límites cruzados

3.6.1 Control del caudal de combustible

La demanda de combustible, procedente del selector de mínima, se acondicionará dependiendo de la configuración del sistema de combustibles. Dentro de las múltiples configuraciones que éste puede presentar destacaremos las siguientes posibilidades:

a) Un combustible.

b) Dos combustibles con uno de ellos en carga fija sin control

c) Dos combustibles indistintamente

d) Dos combustibles con selección de la relación entre ellos

e) Dos combustibles con uno de ellos prioritario según disponibilidad

f) Consideraciones de acuerdo con el número y tipo de quemadores en servicio

A continuación se explican en detalle.

a) En el caso de una caldera con un único combustible, la señal de demanda se enviará como consigna de un lazo PI simple como el que se muestra en la Figura 3-54. Si el caudal supera la consigna, la válvula cerrará, y viceversa. El ajuste de este regulador se hará siguiendo las pautas del de cualquier regulador de caudal.

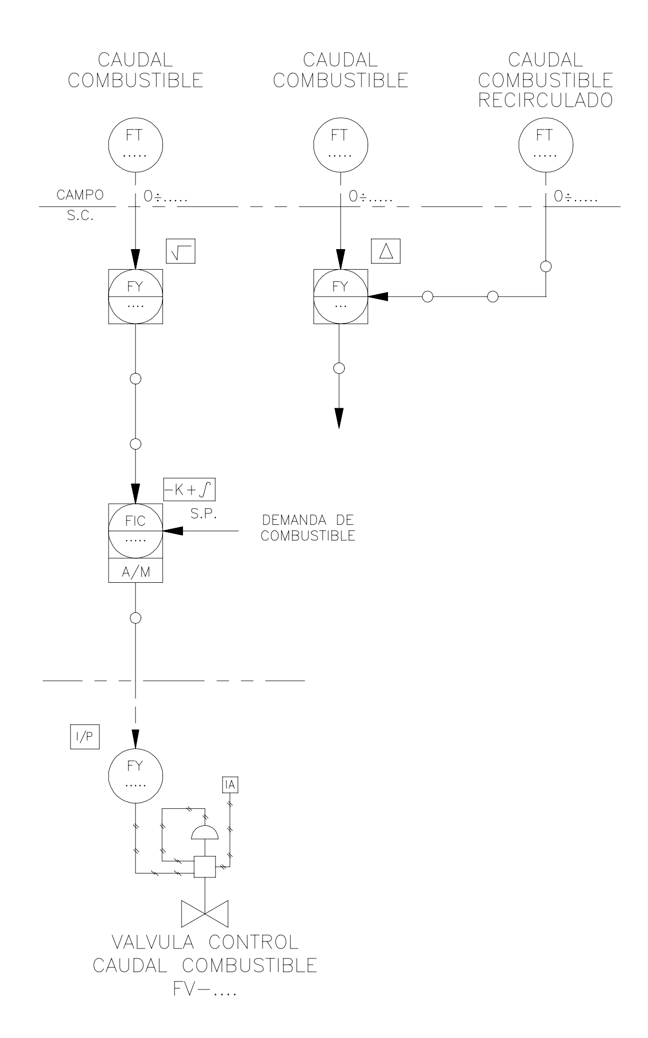


Figura 3-54. Control de combustión para un combustible

En el caso en que el combustible tenga recirculación permanente, hay que considerar que cantidad de combustible está recirculando para no considerarlo en el cómputo, tanto del regulador de caudal como en el de la señal al límite cruzado. La válvula de control de caudal puede estar situada en estos casos en el retorno, con lo cual la acción del regulador deberá ser directa en lugar de inversa.

b) Cuando existe un combustible que aporta una cantidad de calor fija a la caldera, esta aportación fija se puede restar de la demanda de combustible y enviar el caudal del combustible como variable de proceso al regulador de caudal. También podemos enviar como consigna la demanda de combustible

directamente y usar como variable de proceso la salida del sumatorio. En ambos casos, el aporte de calor entregado por el combustible fijo debe sumarse al caudal suministrado por el combustible controlado, basándose en sus poderes caloríficos y sus necesidades de aire, de forma que sea considerado en los límites cruzados para la demanda de aire (Figura 3-55).

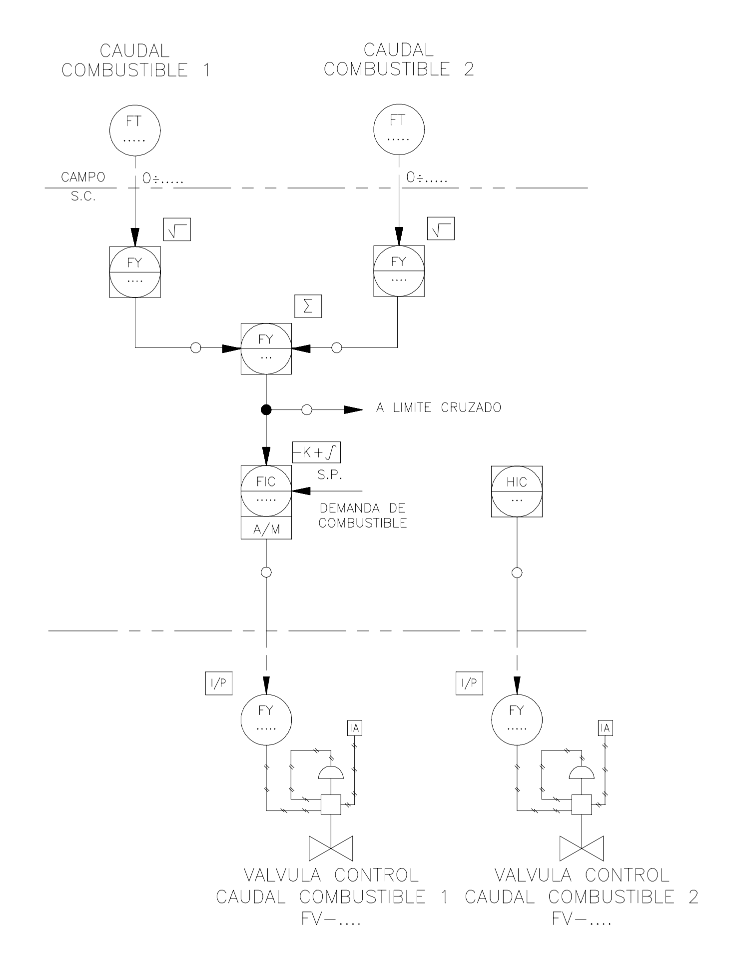


Figura 3-55. Un combustible sin control

c) La Figura 3-56 muestra la configuración en el caso de que lo que se quiera sea quemar indistintamente dos combustibles. Los caudales de ambos combustibles se totalizan combinando los efectos de la diferente aportación calorífica, las diferentes necesidades de aire y el diferente exceso de aire permitido.

Suponiendo que el primer combustible entrega un caudal de a kcal/hr y el segundo de x, que el primero necesita b kg/hr de aire y el segundo y, y que el primer combustible requiere un c % de exceso de aire por un z % del segundo, el cálculo de la suma vendría dado por caudal 1+k* caudal 2 siendo K=(a/x)(b/y)(c/z). Cuando existen más de dos combustibles, se usará siempre el mismo combustible como base para las relaciones del resto.

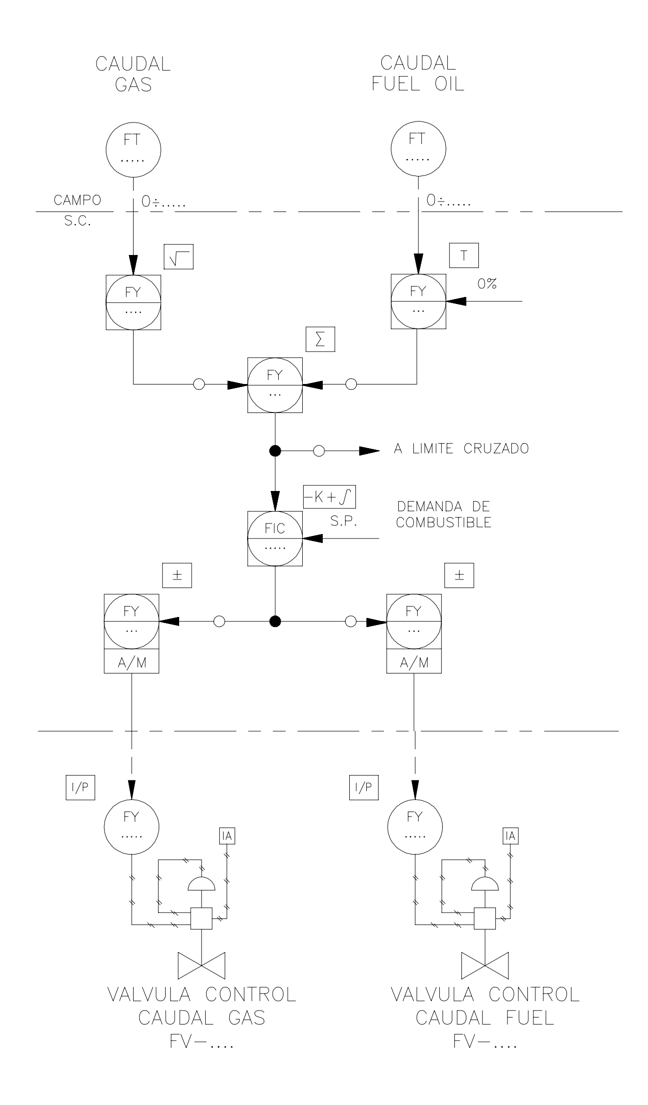


Figura 3-56. Dos combustibles indistintamente

Esta configuración será adecuada cuando el sistema queme dos combustibles pero no de forma simultánea, puesto que la ganancia del sistema sería doble si el regulador se ha ajustado con uno en funcionamiento y la mitad si se ajusta con los dos y sólo hay uno. Cuando se quiere quemar dos combustibles simultánea e indistintamente se debe considerar que la aportación total no debe variar. Para ello se puede utilizar la configuración de la Figura 3-57 en la cual la señal de demanda a las válvulas se parte en la relación deseada. Así la señal de demanda total se multiplica por la relación deseada para uno de los combustibles y la salida de esta multiplicación se resta de la demanda total para generar la demanda al otro combustible. De esta forma, la demanda total no sufre modificación.

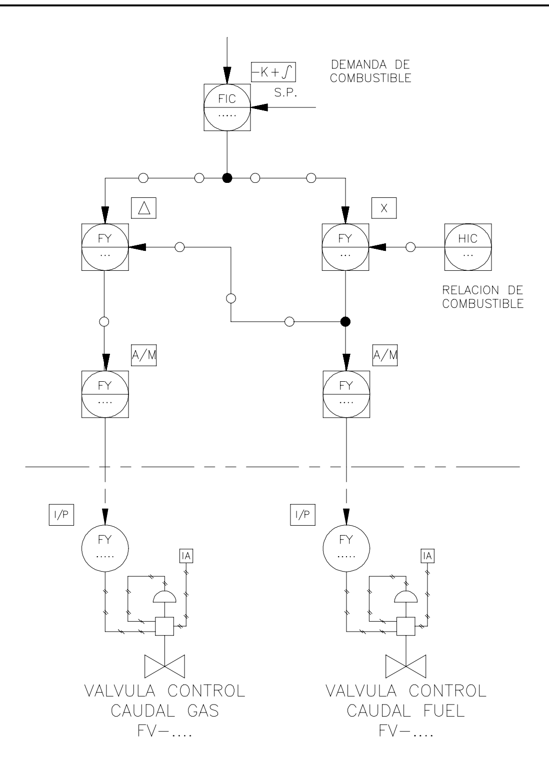


Figura 3-57. Dos combustibles en relación

De forma análoga a lo que vimos anteriormente en la generación de la señal de demanda de carga de caldera, el problema que existe en esta configuración es que ante el disparo de uno de los combustibles el sistema no reacciona adecuadamente. Para solucionar este problema se procederá de la misma forma, como se muestra en la Figura 3-58.

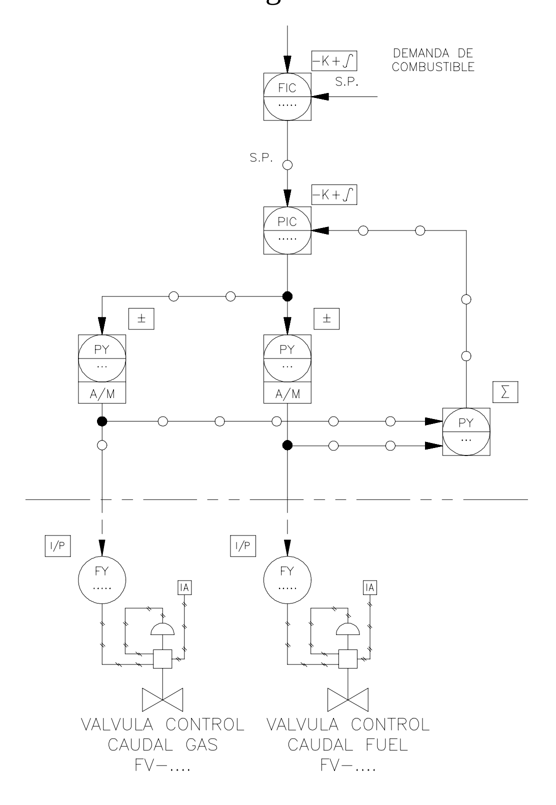


Figura 3-58. Dos combustibles con compensación

Los pesos de las distintas señales en el sumador se darán de acuerdo con las capacidades de las válvulas de control respectivas.

d) Cuando lo que se requiere es establecer una relación de caudales por motivos de costo u otros cualesquiera, se utilizará la configuración de la Figura 3-59.

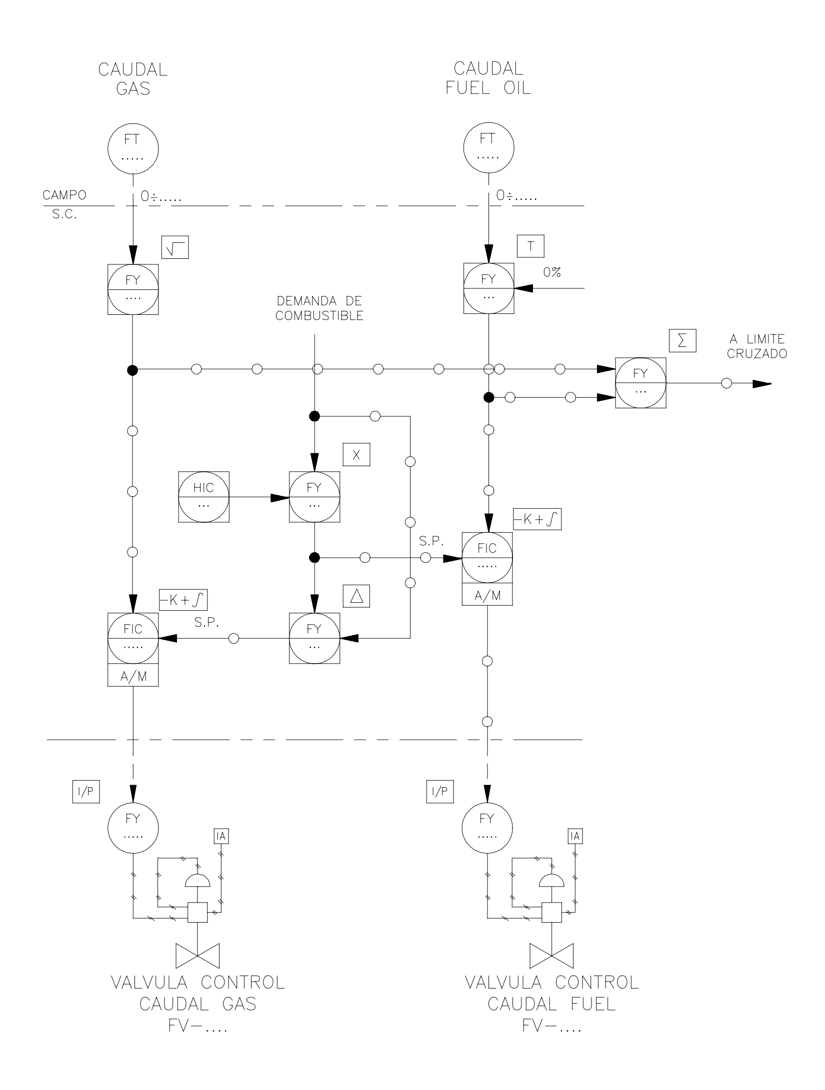


Figura 3-59. Alternativa a dos combustibles en relación

En esta disposición la suma de los caudales se usará sólo en el límite cruzado mientras que cada caudal individualmente se enviará a su respectivo regulador PI como variable de proceso. Las señales de consigna de cada uno de los reguladores se obtienen de partir la señal de demanda total mediante una estación manual que establece la relación deseada. Para que no existan perturbaciones en la carga ante posibles disparos de alguno de los combustibles, la salida de la estación manual que marca la relación deberá contemplar las distintas posibilidades, de forma que dicha relación esté de acuerdo con la máxima disponibilidad presente en cada combustible.

e) Existen muchas instalaciones en las que en los distintos procesos de fabricación se generan diferentes tipos de combustibles de rechazo, que suelen ser aprovechados mediante su combustión. Habitualmente, por motivos medioambientales y económicos es prioritario que dichos combustible se quemen de forma continua de acuerdo con su disponibilidad. La Figura 3-60 muestra la configuración del lazo para este tipo de particularidad.

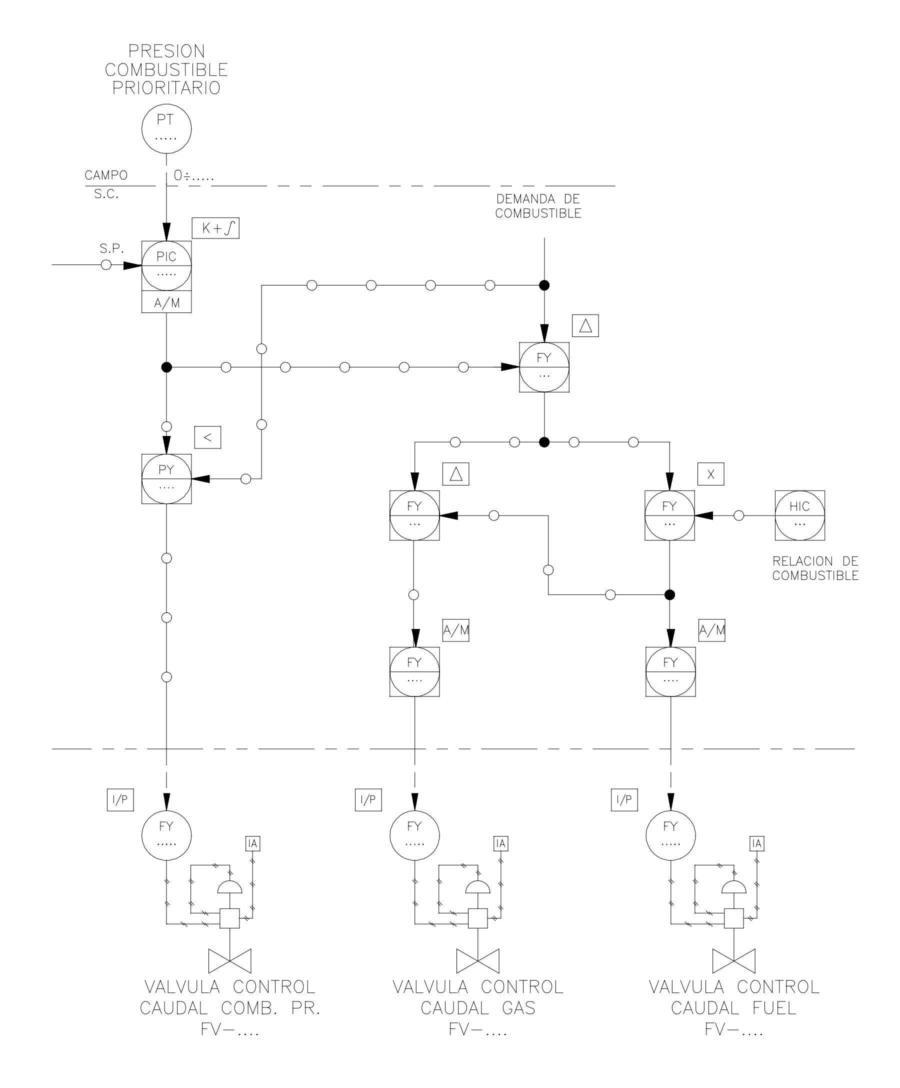


Figura 3-60. Un combustible prioritario por disponibilidad

La señal que nos indica la disponibilidad es en este caso obtenida de un regulador PI que utiliza como variable de proceso la presión en el colector de suministro del combustible de rechazo. Esta señal se podría obtener igualmente de una señal de nivel de un tanque, etc.. De acuerdo con la estrategia global utilizada, la salida del regulador de disponibilidad se enviará directamente a su válvula de control y tras restarse de la demanda total de combustible se enviará directamente a las válvulas de control de los otros combustibles, o se enviará como consigna de su regulador y la resta tras filtrarse por la relación de combustibles deseada se enviará a las consignas de los reguladores del resto de combustibles (Figura 3-61)

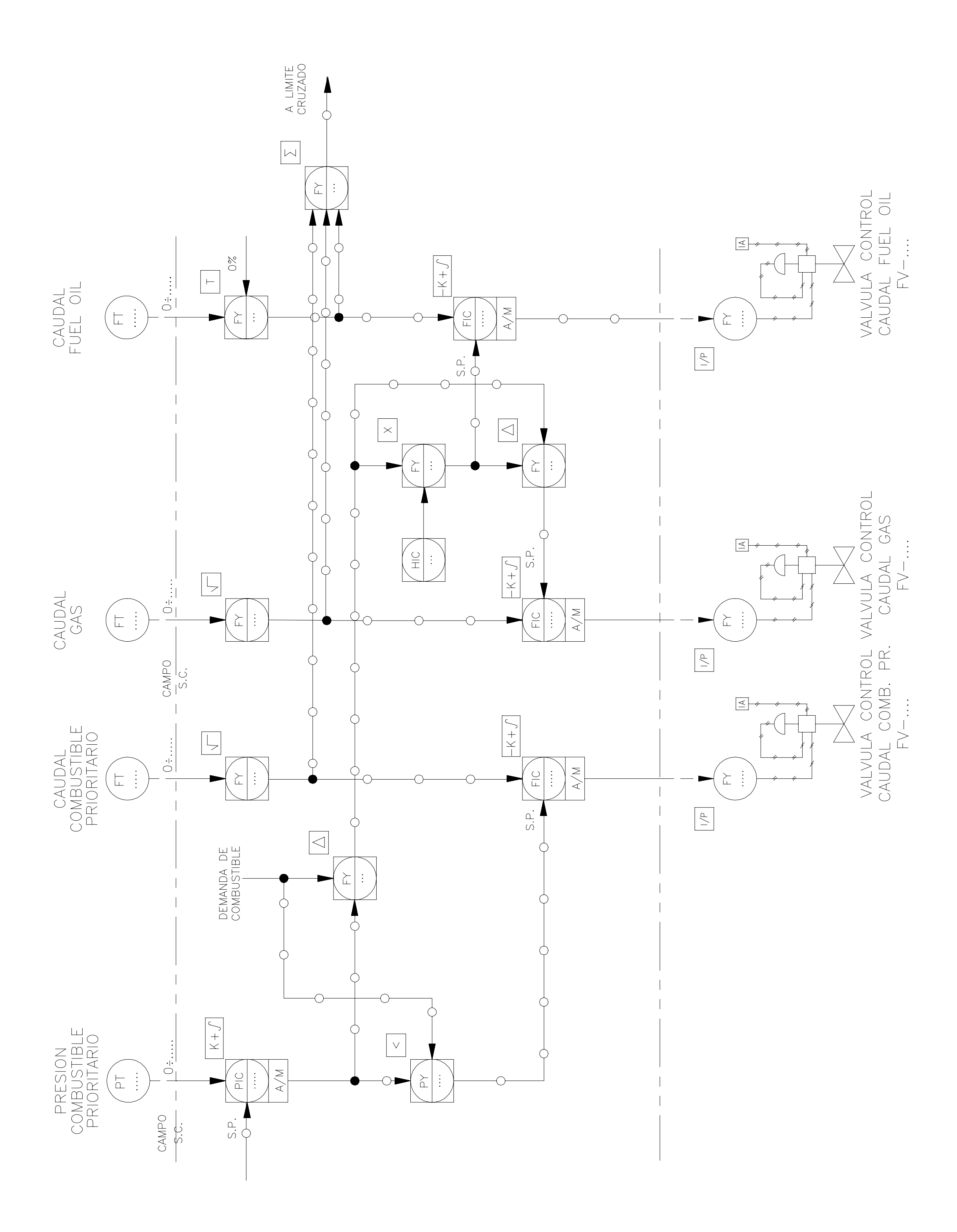


Figura 3-61. Alternativa a un combustible prioritario

f) En todas las configuraciones vistas hasta el momento, no se ha tenido en cuenta en modo alguno el número de quemadores con el que cuenta la caldera. Como consecuencia, ante el disparo de un quemador y puesto que la demanda de combustible no se modifica por ello, los otros quemadores absorberán la carga del quemador disparado. Esto puede llevar a que se sobrepasen los límites de aportación de calor soportados, bien por el equipo, bien por determinada zona de la caldera. El problema obviamente se agrava cuando el número de quemadores no es muy grande. Si suponemos una caldera de cuatro quemadores en la que cada uno aporta un 25 % de caudal, el disparo de uno de ellos con la caldera a plena carga, hará que cada uno de los tres quemadores que permanece en servicio aumente su carga en un 8,3 %, pudiendo originar problemas de longitudes de llama, de calentamiento puntual de tubos, etc. Para solucionar este problema se puede usar una configuración como la que se muestra en la Figura 3-62. La demanda de carga se limita de acuerdo con el número de quemadores de cada tipo que están en servicio. Sin embargo, esto no será suficiente cuando existe la posibilidad de quemar dos o más combustibles en el mismo quemador. Para no sobrepasar la capacidad individual de cada quemador cuando más de un combustible está en servicio, se limita la capacidad del combustible presente en menos número de quemadores, de forma que la suma de ambos combustibles no sobrepase la capacidad de 25 % en un quemador. Supongamos que tres quemadores de fuel oil están encendidos y uno de ellos quema además gas, siendo la demanda de 75% y la relación requerida del 25% de gas. En estas condiciones la demanda de fuel oil será de un 56.25 % (75*.75) y la de gas 18.75 %. Al haber tres quemadores de fuel oil en servicio la carga de cada uno será de 18.75 %, con lo que el quemador que está quemando mixto tendría una carga del 37.5 %. Al aplicarse los límites por quemador, el gas quedará reducido a una carga máxima de 6.25 % (25-18.75) de forma que no se sobrepase el límite.

Otra posible circunstancia a tenerse en cuenta para limitar su repercusión, es la descompensación de carga entre los distintos niveles de quemadores. En gran parte de calderas industriales a las que se refiere este curso, la aportación de aire a los quemadores se modula de forma global a todos los quemadores de acuerdo con la carga. Como consecuencia, si existiese un desequilibrio grande en la aportación de combustible a los quemadores, conllevaría el que parte de ellos estuviesen quemando con un gran exceso de aire y otros por el contrario con un gran defecto de aire. Esto puede pasar cuando se queman más de un combustible pero no se hace en todos los quemadores, o cuando un nivel está quemando un combustible en manual y el otro trabaja en automático con el otro combustible.

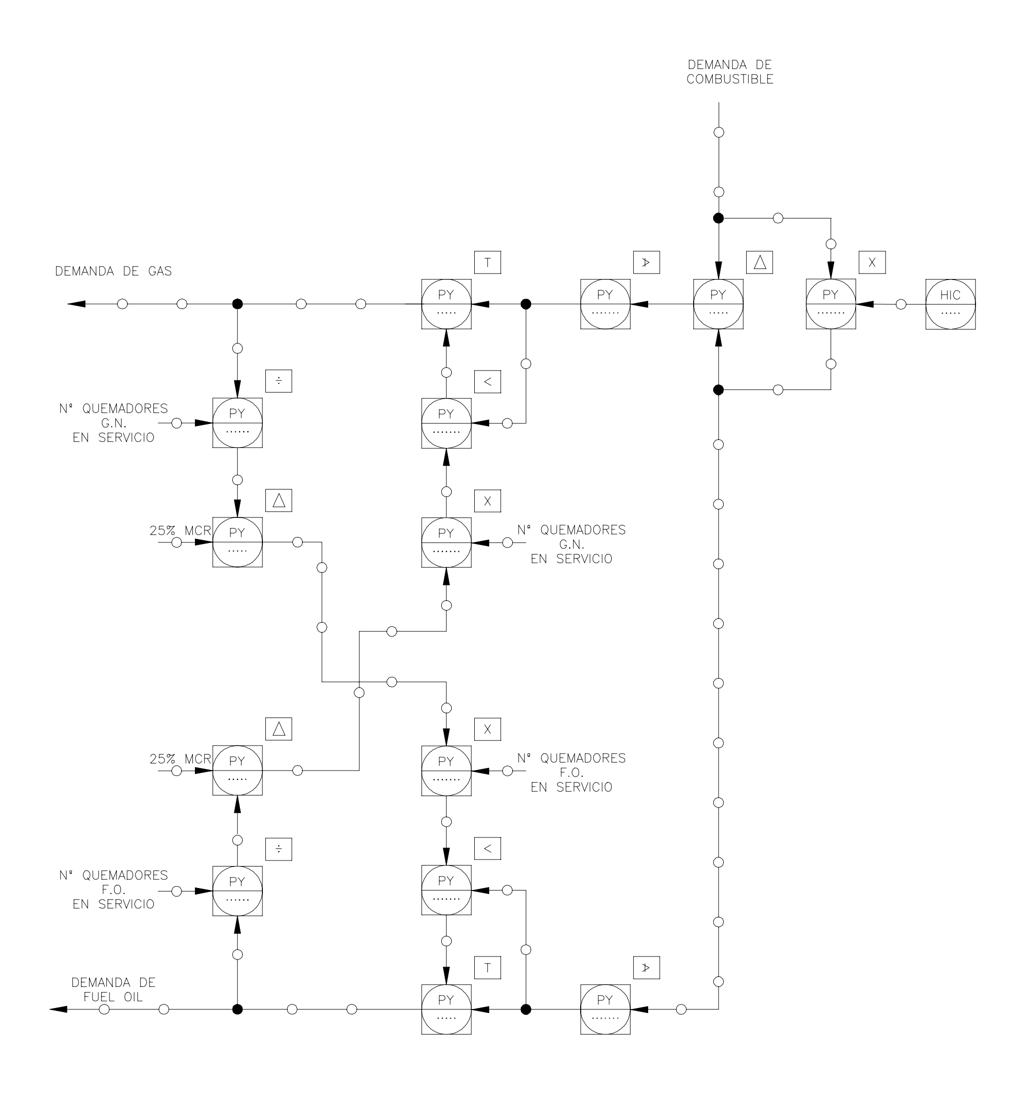


Figura 3-62. Limitación en función de los quemadores

3.6.2 Control del caudal de aire

Para el control del caudal de aire a la caldera se utiliza la estructura típica de un lazo de control PI simple como el que se muestra en la Figura 3-63.

La medida del caudal de aire se caracteriza mediante el f(x) para las necesidades de los combustibles existentes, de forma que exista una relación lineal 1 a 1 entre combustible y aire, incluyendo la combustión mixta si existe.

La señal de consigna del regulador será la procedente del selector de máxima entre la demanda y el caudal de combustible, tras filtrarse por un límite de mínima del 25% que asegure una velocidad mínima del aire a través de la caldera. La variable de proceso será el caudal de aire tras hacerlo lineal con respecto al caudal de combustible. El ajuste del regulador se hará siguiendo las pautas para cualquier

lazo de caudal. Se debe recordar que las respuestas del control de combustible y del de aire deben ser lo más simultáneas posibles para evitar al máximo las interacciones, por lo que finalmente el ajuste de alguno de estos lazos puede ser inferior al óptimo.

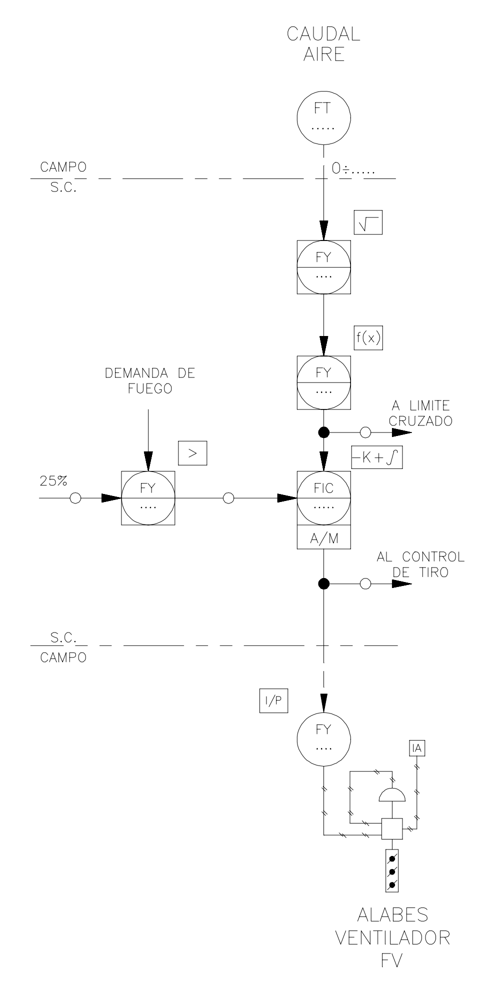


Figura 3-63. Control del aire de combustión

Cuando la instalación usa ventiladores de tiro forzado e inducido, es aconsejable usar la señal al elemento de control de caudal de aire como señal de anticipo (feedforward) en el control de tiro.

En algunas instalaciones el control del caudal del aire se realiza no sólo mediante el posicionamiento de los álabes de entrada al ventilador, sino que además éste trabaja a velocidad variable a fin de optimizar el rendimiento. En estos casos, la señal de demanda al elemento de control se debe caracterizar de forma que los álabes regulan mientras el ventilador se mantiene a la mínima velocidad, y una vez aquellos han alcanzado su apertura máxima se modula la velocidad del ventilador (Figura 3-64).

Como en la parte final del recorrido de los álabes la variación del caudal apenas será significativa, y a fin de mantener una respuesta lo más lineal posible, existirá un solapamiento en el que se abrirán los álabes al tiempo que se aumenta la velocidad del ventilador.

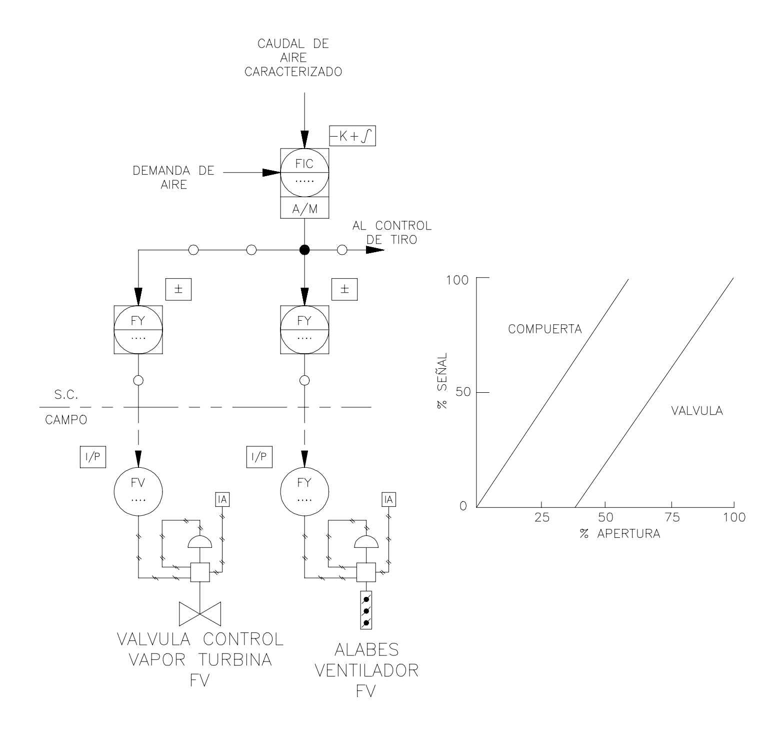


Figura 3-64. Control de rango partido turbina/álabes

En algunas instalaciones el aire de combustión es generado por dos ventiladores trabajando en paralelo. En estos casos se debe considerar el posible fallo de uno de los ventiladores. Como ya hemos visto en diversas situaciones similares anteriormente, mediante la inclusión de un regulador de compensación (Figura 3-65) se pueden solucionar tanto los problemas de ganancia para diversas condiciones como las respuestas ante fallos de los equipos.

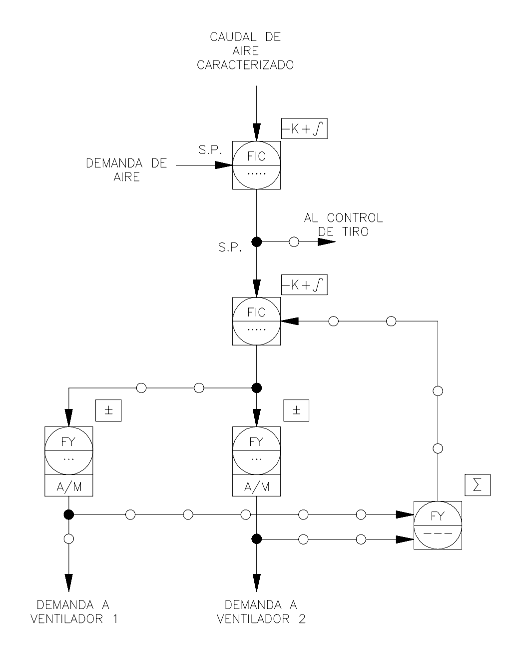


Figura 3-65. Compensación automática del nº de ventiladores

En aquellas instalaciones en las que existe una regulación de los registros de aire a los quemadores, la señal a éstos se obtiene de la demanda de salida al elemento de control del caudal (Figura 3-66).

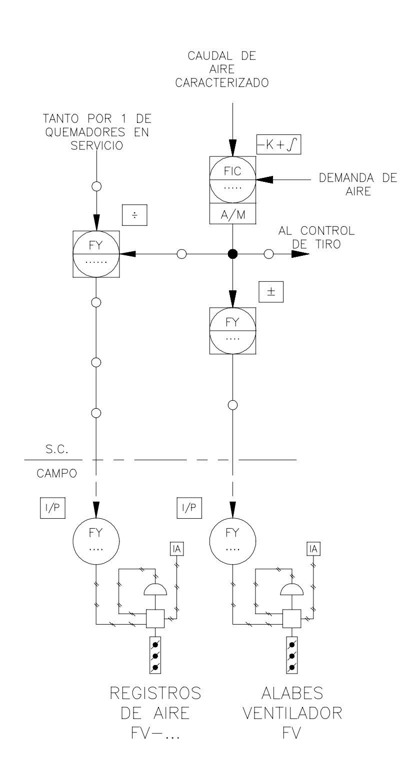


Figura 3-66. Control de los registros de aire de quemadores

La salida a los registros hay que acondicionarla de acuerdo con el número de quemadores en servicio, pues la carga de cada uno de ellos dependerá de la carga de caldera y del número de ellos en servicio.

Aunque la caracterización de las señales de combustible y aire se ajusten para todo el rango de operación y se logre mantener una relación de combustible aire satisfactoria, ésta por las propias restricciones del proceso nunca será la óptima para mantener la combustión más eficiente posible si sólo se aplican los controles explicados. Para mantener el exceso de aire mínimo necesario para una combustión segura y eficaz, es necesario analizar los gases de la combustión y usar el resultado de dicho análisis para la optimización del control de combustión.

La relación óptima entre aire y combustible viene marcada para cada combustible por un porcentaje de exceso de oxígeno y de CO_2. Mientras el porcentaje en O_2 es único y válido como un índice inequívoco de la calidad de la combustión, el CO_2 como se observa en la Figura 3-67 puede tener el mismo valor en condiciones óptimas o inseguras, por lo que su uso como variable de proceso principal se descarta y sólo se suele usar como variable secundaria. Por otra parte, el índice de inquemados en la combustión queda definido por el CO existente en los gases. El aumento del nivel de CO en los gases es indicativo de que la combustión no es completa.

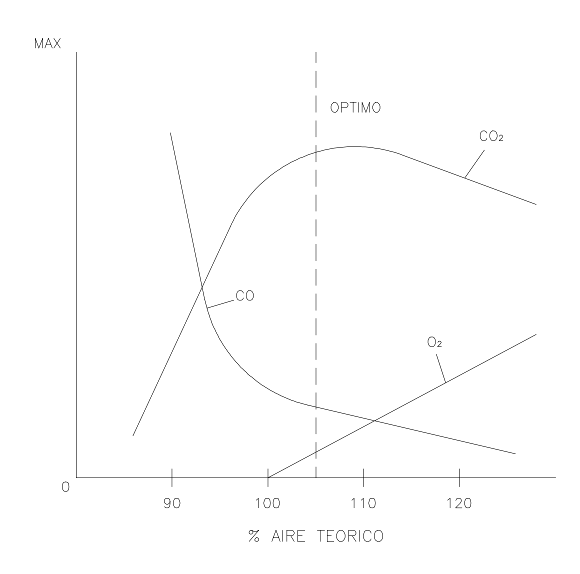


Figura 3-67. Relaciones O_2, CO_2, CO

Existen, en función de la variable utilizada, dos teorías básicas de control que se usan con el análisis de los gases de combustión.

La primera de ellas usa el porcentaje de oxigeno como variable para corregir la medida de aire. Para ello se utiliza un regulador PI simple como el de la Figura 3-68 en el que la variable de proceso será la medida del analizador de O_2. La consigna vendrá dada a través de un generador de función que nos relaciona la carga de la caldera con el exceso de oxígeno óptimo, puesto que dicho exceso va disminuyendo con la carga como se muestra en la Figura 3-69. Esta relación debe considerar la posible combustión mixta.

El ajuste del regulador debe tener una ganancia pequeña basada en la relación existente entre un cambio en el exceso de aire y en el caudal de éste. La acción integral será igualmente baja al ser la constante de tiempo grande, transcurren al menos 20 o 30 segundos desde que se toma la acción hasta que se refleja en una nueva medición. Debido a la fiabilidad de la medida y a las posibilidades de fallo de los analizadores en comparación con los medidores de caudal, la salida del regulador se utilizará como factor de multiplicación del caudal de aire sólo entre unos límites de 0.85 a 1.15.

En la segunda variante la variable de proceso será la medida de CO en ppm y la consigna ha venido dada tradicionalmente por el CO que se desea mantener. Generalmente se ha aceptado que el CO permanece constante con la variación de la carga y que manteniendo unos niveles en torno a 200 ppm se asegura una combustión eficaz. Sin embargo, esta suposición no es cierta y al igual que en el caso del O_2 el CO deberían variar y probablemente incrementarse con la carga.

Por este motivo el control del CO sería igualmente realizado con una configuración como la de la Figura 3-68.

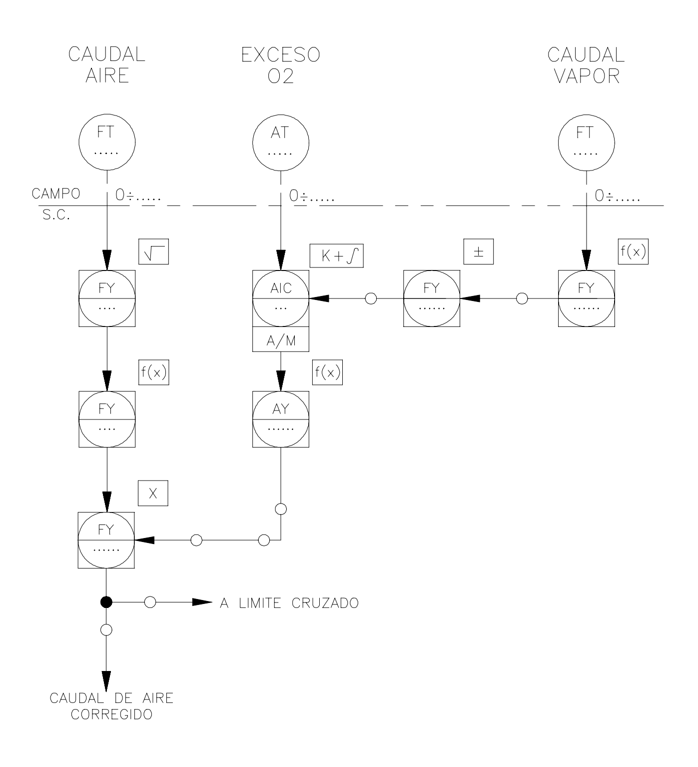


Figura 3-68. Corrección del caudal de aire por O_2

En algunas instalaciones, se opta por una corrección del caudal de aire mixta basada tanto en la medida de O_2 como en la de CO_2 (Figura 3-70).

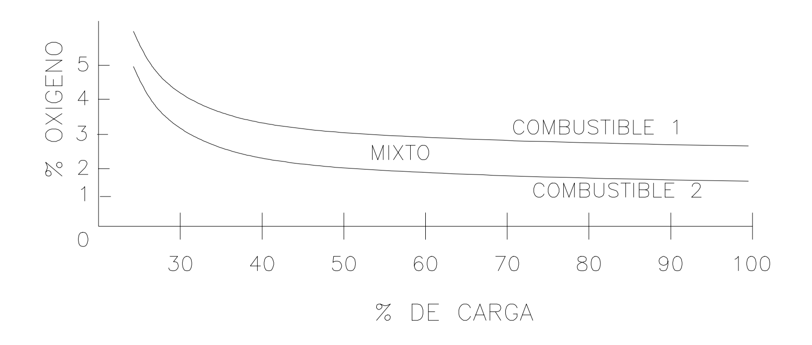


Figura 3-69. Exceso de oxígeno en función de la carga

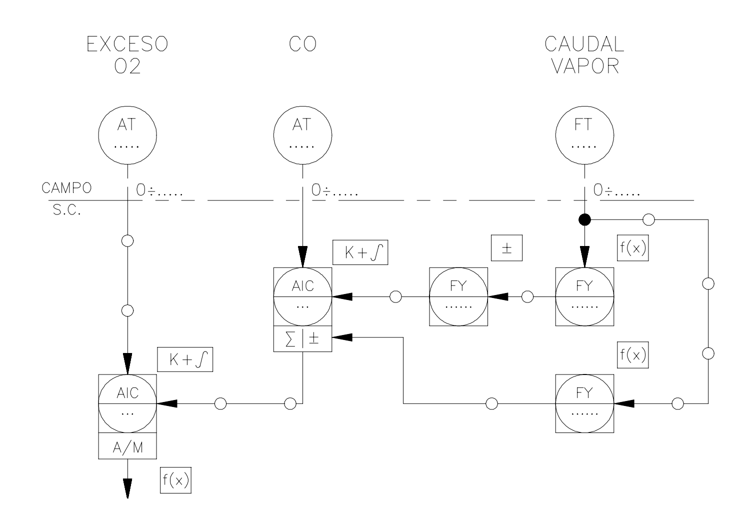


Figura 3-70. Corrección del caudal de aire por O_2 y CO

En este caso se usa un control en cascada en el que la variable primaria es el CO cuya consigna se define en función de la carga. La salida de este controlador se utiliza para corregir la consigna también en función de la carga del regulador de O_2.

Enclavamientos

El control de combustión de una caldera está estrechamente ligado al sistema de seguridades de la misma. Por este motivo, existen diversos enclavamientos procedentes de éste que actúan sobre la configuración del control de combustión, como son los siguientes:

– Los reguladores de control de caudal de combustible se forzarán a su posición de encendido cuando no exista ningún quemador en servicio, de forma que la válvula de control se encuentre en dicha posición cuando se va a realizar su encendido.

– El regulador de control de aire se fuerza a una posición determinada durante la purga de la caldera, además de llevarse al 100% en el caso de pérdida de ventiladores para efectuar la secuencia de tiro natural.

– En el caso de existir dos ventiladores, la salida individualizada se forzará a 0 % cuando su correspondiente ventilador se encuentre fuera de servicio, a menos que se produzca la pérdida total de ventiladores, en cuyo caso debe realizarse el tiro natural, para lo cual se llevará como se ha dicho al 100%.

– Como se comentó anteriormente, el número de quemadores en servicio actuará sobre la estación manual que fija la relación entre los combustibles de

forma que exista congruencia entre los quemadores en servicio y la relación pedida.

- Igualmente, el número de quemadores en servicio fijará los límites en la demanda a sus respectivos reguladores en función de la carga máxima soportada por cada quemador.

Por otra parte, como ya se comentó en el caso de que se usen equipos de capacidad parcial la pérdida de éstos debe limitar la demanda de carga.

A fin de evitar relaciones de aire combustible no deseadas, los reguladores de combustible han de permanecer en manual mientras el regulador de aire esté en manual.

Para evitar la saturación en el control de O_2, este lazo estará en manual mientras lo esté el de caudal aire o bien se mantendrá en modo seguimiento.

3.7 Control del tiro

Objetivo

El objetivo de este lazo es mantener la presión del hogar dentro de una estrecha banda en torno al punto de consigna para asegurar una combustión satisfactoria así como una operación segura.

Filosofía del control

En las calderas con ventiladores de tiro forzado e inducido, se ha de mantener un tiro equilibrado de forma que la presión en el hogar se mantenga en torno 0. Para ello, se actúa sobre el elemento de control en el ventilador de tiro inducido para que provoque más o menos succión. La forma más simple de control sería la representada en la Figura 3-71, en la cual la presión del hogar se utilizaría como variable de proceso, siendo la consigna el valor de presión deseado.

Este tipo de control suele ser inadecuado en la mayoría de los casos. El caudal de aire de combustión es manejado por la mayor o menor aportación del ventilador de tiro forzado. Cada vez que el caudal de aire se modifica se produce un cambio en la presión del hogar. Por otra parte, la presión del hogar es una variable sujeta a una gran cantidad de ruido de proceso que en principio debería ajustarse con poca ganancia e integral para minimizar el efecto de este ruido. Esto crea más problemas en la respuesta ante cambios de carga, pues éstos conllevan modificaciones en el caudal de aire.

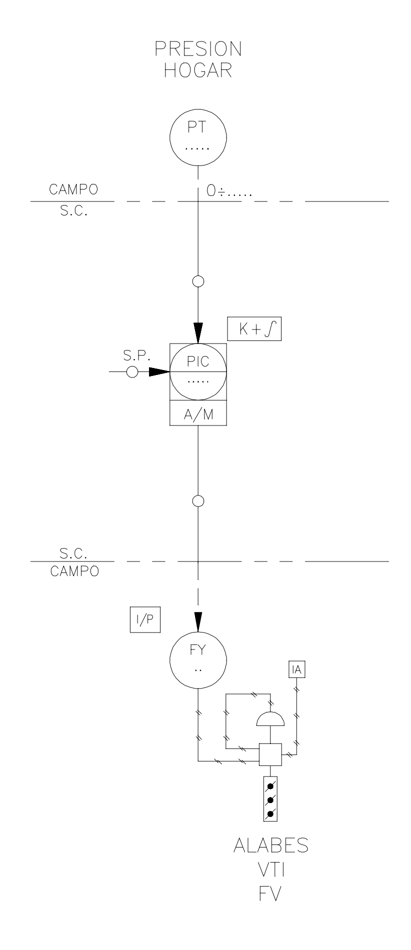


Figura 3-71. Control de tiro

Para solucionar este último problema se suele usar un regulador con ganancia variable, de forma que la ganancia sea pequeña cuando el error se mantiene dentro de unos límites y se incremente sustancialmente cuando el error los sobrepasa.

Adicionalmente, para solucionar la correcta respuesta ante cambios en el caudal de aire, se utiliza la demanda al elemento de control de éste como índice de la posición del ventilador de tiro inducido y corregido éste por el error en presión (Figura 3-72).

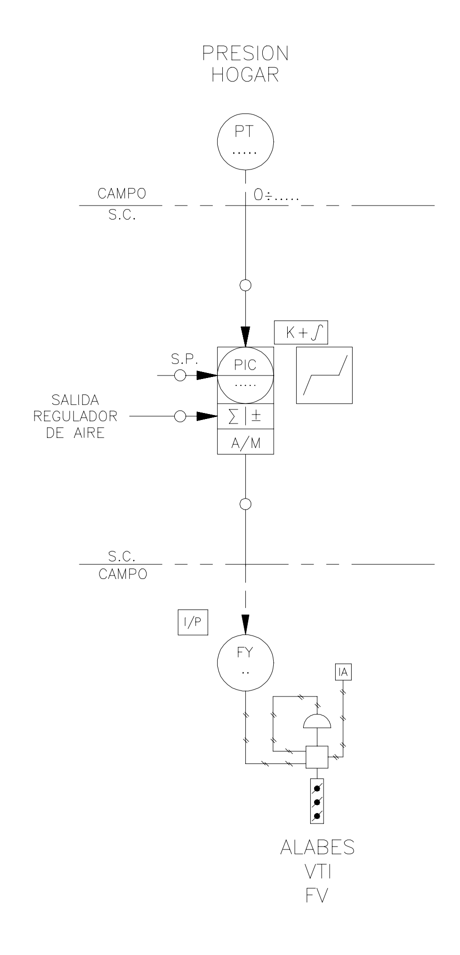


Figura 3-72. Control de tiro con ganancia variable y feedforward

Este diseño permite que el controlador sea considerablemente lento sin reducir la efectividad del lazo y reduciendo el efecto del ruido lo que genera mayor estabilidad. Puesto que ambos ventiladores trabajan en paralelo la interacción entre ellos se reduce significativamente.

Como hemos visto en otros apartados, en el caso de que existan dos ventiladores de tiro inducido, la salida de control debe ser partida de acuerdo con el peso de cada uno de los equipos. Además el lazo debe estar preparado para situaciones de fallo de uno de los equipos en cuanto a ganancia (Figura 3-73).

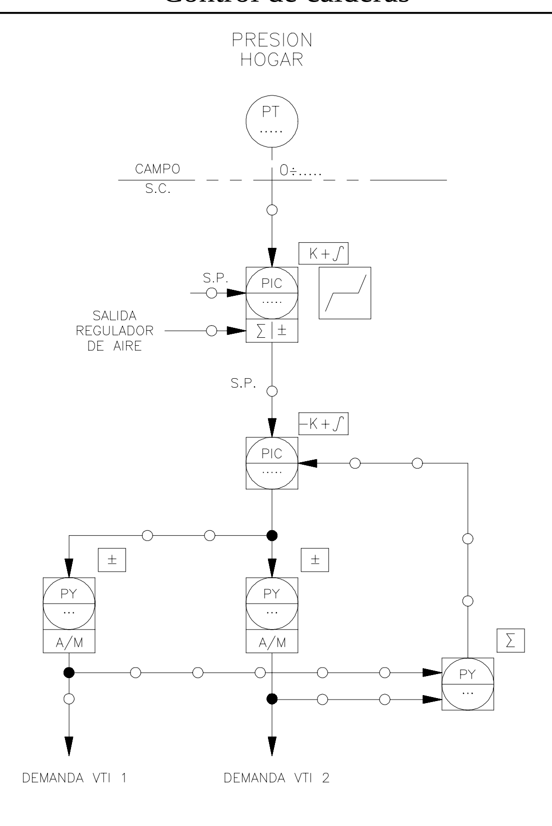


Figura 3-73. Compensación automática del nº de ventiladores

Aunque el comportamiento de este diseño puede ser suficiente para mantener la presión del hogar en el valor deseado, puesto que el mal funcionamiento de este lazo puede conllevar serios riesgos de seguridad en cuanto a la integridad de la caldera y de las personas, el estándar NFPA para calderas de más de un quemador exige un diseño aún más complejo (Figura 3-74).

De acuerdo con este estándar el sistema debe incluir las siguientes características y funciones:

– Tres transmisores de presión para minimizar la posibilidad de trabajar con una medida de presión errónea.

– Una señal anticipativa que represente la demanda de aire. Esta señal podrá ser la demanda de aire, caudal, de carga de caldera, pero en ningún caso el caudal de aire (puesto que crearía problemas de interacción y realimentación positiva).

– Una acción de corrección que minimice las excursiones de presión tras la estación auto/manual.

– Un acción de anticipación ante un disparo de caldera que minimice las excursiones de presión tras la estación auto/manual.

– Cuando se usen ventiladores axiales, éstos deben operar de tal manera que se eviten las condiciones de *stall.*

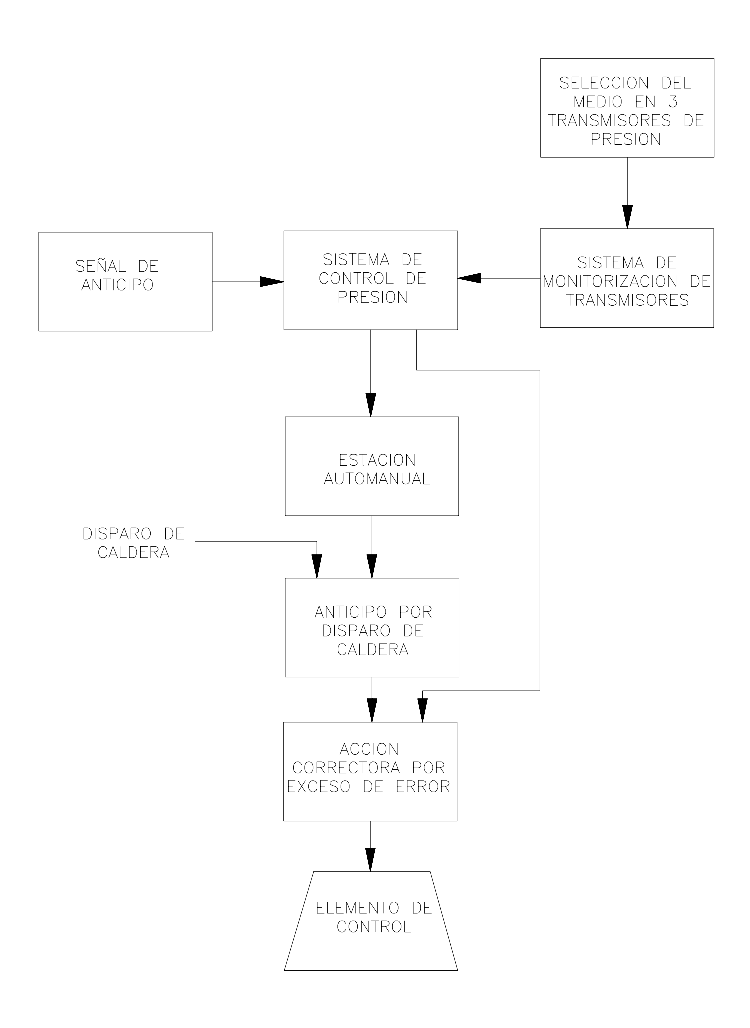


Figura 3-74. Requisitos de la NFPA 8502

Un posible diseño incluyendo estas necesidades sería el representado en la Figura 3-75. El sistema recibe las señales procedentes de tres transmisores diferentes y ejecuta una votación dos de tres con sus medidas. Esta votación puede ser la elección del medio (Figura 3-76), para lo cual se compararían dos a dos seleccionándose el menor, y la salida de estas tres comparaciones se comparan de nuevo seleccionándose en este caso el mayor. Otra posible forma de votación sería hacer la media dos a dos y seleccionar posteriormente la mayor o la media (Figura 3-77). En este caso, la media dos a dos sólo será válida para la comparación cuando no existe una desviación excesiva entre los transmisores. En ambos casos se deben dar alarmas de desviación para cumplir con el requisito de vigilancia de las variables.

La señal procedente de los transmisores se envía como variable de proceso al regulador de ganancia variable cuya salida es corregida por las dos causas exigidas. En el primer caso, cuando se produce un disparo de caldera MFT, el hogar se enfría y se produce depresión. Para minimizar sus efectos, se ejecutará una rampa desde el caudal de aire presente en ese momento hasta cero, que corregirá la salida del regulador en el sentido necesario para reducir el tiro.

La segunda corrección debe hacerse cuando el error excede unos valores límites. Esta corrección puede hacerse, bien corrigiendo la posición como se muestra, bien limitando la apertura o cierre del elemento de control. En este caso mediante un generador de función y basándose en el error el sistema genera una señal correctora que actuará en sentido contrario al error.

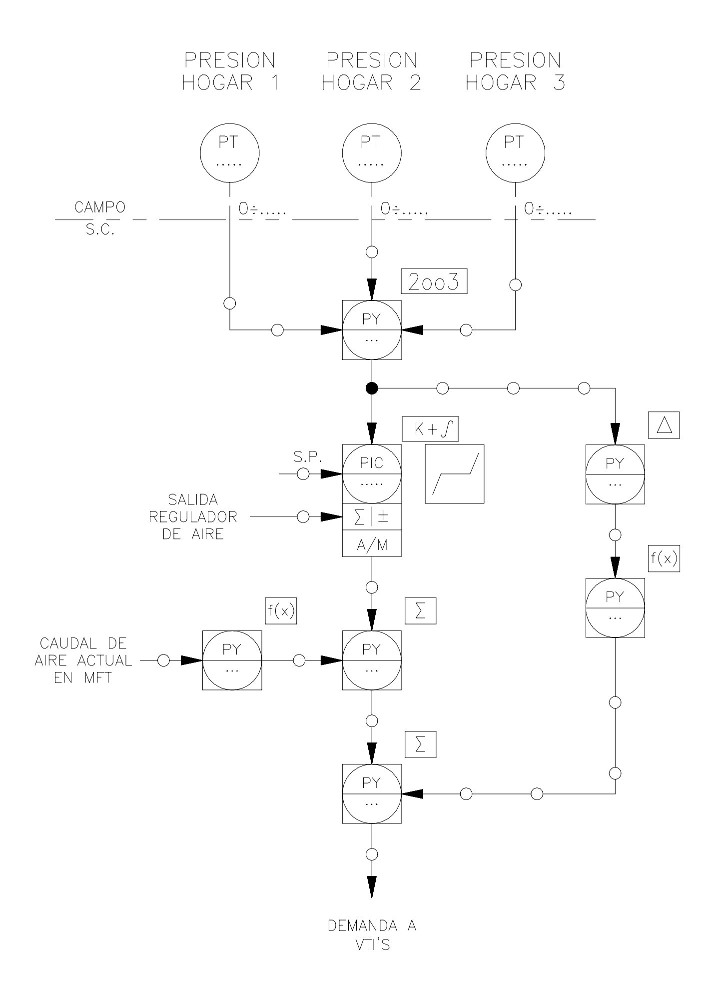


Figura 3-75. Control de tiro incluyendo protección contra implosiones

Enclavamientos

Además de los enclavamientos propios de la secuencia de arranque del ventilador con relación a sus compuertas, cuando el control de hogar se pasa a manual, el control de caudal de aire, oxígeno y combustible deben pasar a manual.

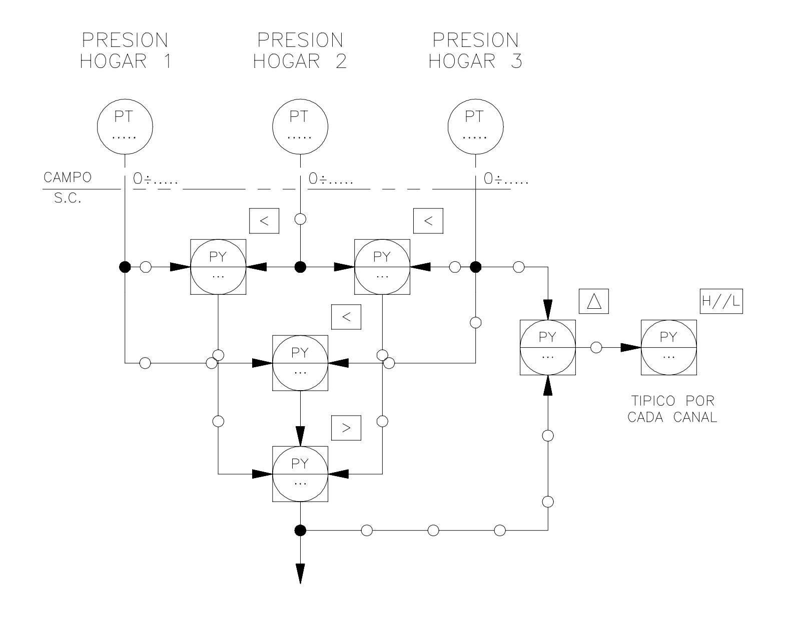


Figura 3-76. Selección del transmisor del medio

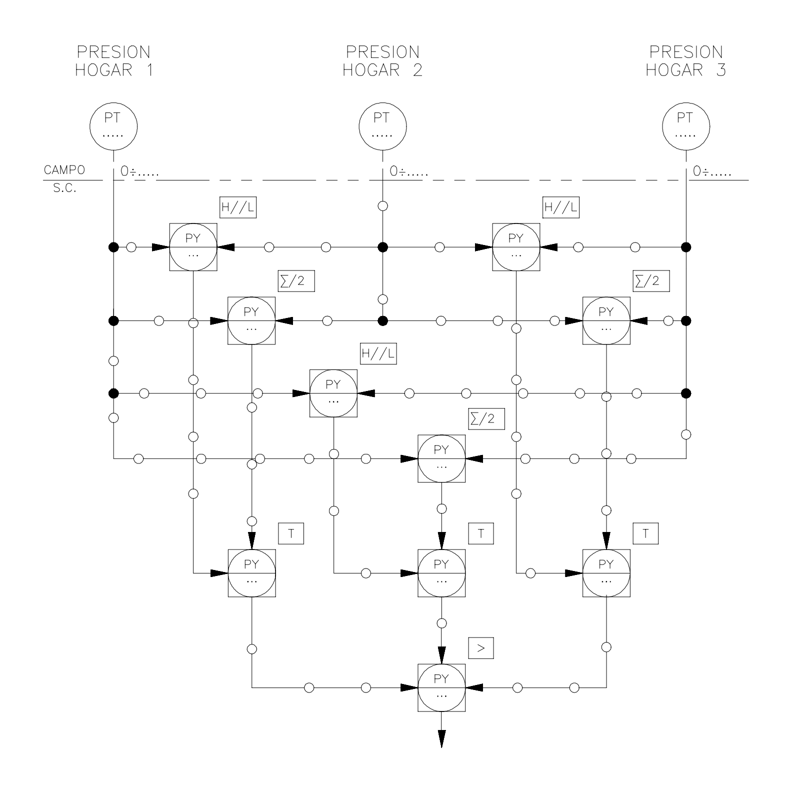


Figura 3-77. Votación dos de tres en transmisores

3.8 Control de combustión en calderas de recuperación

Objetivo

El objetivo del control de combustión en una caldera de recuperación es, como en el caso de una caldera industrial, mantener el caudal de combustible de acuerdo con la demanda de carga de la caldera, en el rango de trabajo de la postcombustión para entregar al sistema la energía requerida para el suministro del caudal de vapor deseado manteniendo el equilibrio energético.

También será el encargado de impedir que se superen los límites de la aportación de calor. En el caso de las calderas de recuperación esto adquiere una gran importancia. En muchas instalaciones el sistema de combustión se dimensiona para trabajar en modo aire fresco y dar el 100 % de la producción, sin embargo al trabajar en modo gases turbina la aportación del sistema de combustión debe ser en gran parte limitada para no sobrepasar la entrada de calor máxima soportada por la caldera.

Adicionalmente, en algunas de estas calderas existirá un control de posición del diverter para mantener la presión del colector en el rango de trabajo sin postcombustión.

Filosofía del control

En las calderas de recuperación de calor, por su especial modo de funcionamiento y variedad de configuraciones, el control de la presión del colector difiere en gran parte de lo visto hasta el momento. La principal variación reside en que el oxígeno de la combustión se extrae, durante la operación normal de la caldera en modo gases de turbina, en lugar del aire ambiente a través del ventilador, de los gases de escape de la turbina de gas al ser éstos todavía ricos en él.

Otra variación inherente a este tipo de calderas es que la primera parte de la producción se obtiene de los gases de escape de la turbina, y, normalmente, una vez alcanzada la máxima producción con éstos, se incrementa mediante la postcombustión.

Por otra parte, estas calderas si su aportación del vapor es de gran importancia para la planta, pueden ir provistas de un ventilador de aire fresco que permite que trabajen con la turbina de gas fuera de servicio.

Modo gases de turbina

En este modo de operación para mantener la presión de vapor en el colector se debe establecer un rango partido entre la demanda de fuego a los quemadores (postcombustión) y la demanda necesaria para mantener dicha presión en el rango de trabajo sin quemadores (sin postcombustión), como se muestra en la Figura 3-78.

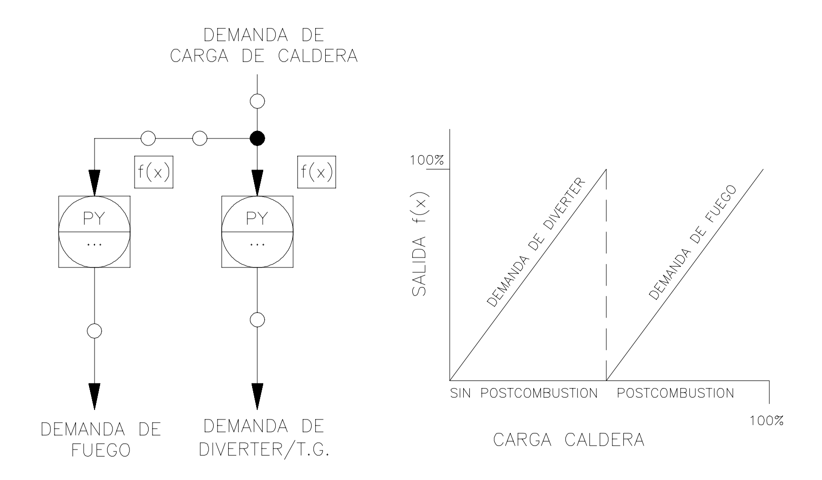


Figura 3-78. Rango partido de la demanda de carga

La demanda para el rango de sin postcombustión puede ser, o enviada al sistema de control de la turbina de gas en orden a regular su carga para mantener la presión de vapor deseada, o usada como demanda de posición del diverter entre turbina y caldera, si éste existe, a fin de mantener la turbina de gas a plena carga.

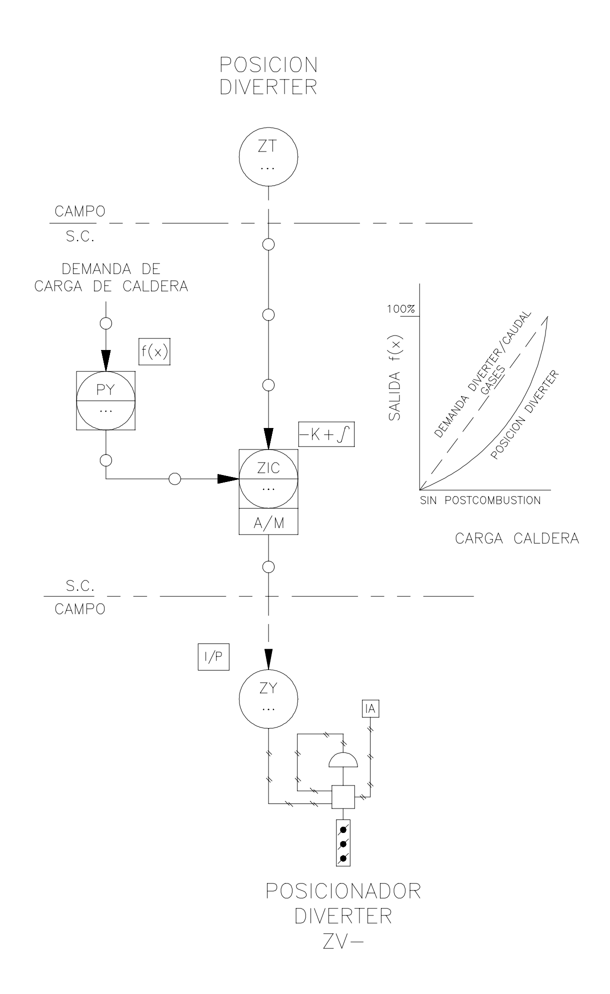


Figura 3-79. Control del diverter

En el caso de que exista diverter y éste se use para modular, se puede usar un control por posicionamiento sin realimentación o, si existe transmisor de posición del diverter, un lazo PI simple como el que se indica en la (Figura 3-79). El generador de función del rango partido hará lineal la demanda de vapor con la posición del diverter en función del caudal de gases que dicha posición permite pasar hacia la caldera.

El control de la carga de la caldera mediante el uso del diverter no es muy recomendable al ser un control muy poco preciso y lento. Además, desde el punto de vista de operación de la caldera puede ocasionar distribuciones del volumen de gases no homogéneas que pueden motivar problemas de mala circulación por calentamiento desigual. Existen otras alternativas como la regulación de la turbina de gas, el uso de una válvula de control en el venteo o en el bypass que son más adecuados, aunque obviamente la decisión se tomará basándose en todas las particularidades de cada planta.

Existen instalaciones en las que se necesita toda la capacidad de postcombustión de la caldera incluso para cargas parciales de la turbina de gas. Si la caldera acepta este modo de funcionamiento, pues la primera consecuencia de él es que el volumen de gases de la turbina disminuye y, como consecuencia, ante la misma aportación de calor por parte de los quemadores las temperaturas de gases pueden exceder las permitidas, será necesario la modificación del rango partido para adecuarlo a las nuevas necesidades. El generador de función de la demanda de combustible (Figura 3-78) debe ser modificado en función de la carga de turbina. Al reducirse la carga de ésta, la producción de vapor sin postcombustión disminuirá y por tanto el ámbito de ésta debe ser modificado como se muestra en la Figura 3-80. Normalmente en estas condiciones la producción total queda limitada

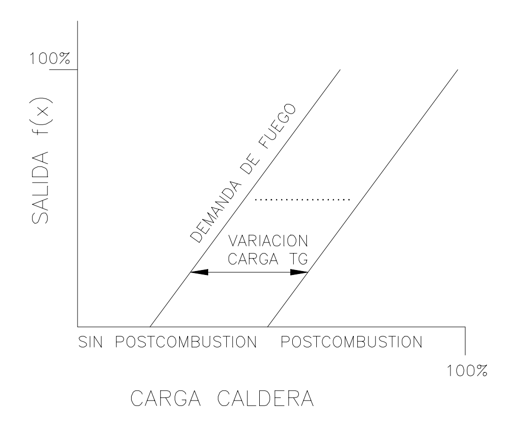


Figura 3-80. Demanda de combustible en función de la carga de la TG

La demanda de combustible por su parte debe acondicionarse de acuerdo al sistema de combustión implementado.

Existe una gran variedad de configuraciones posibles del sistema de combustión en este tipo de calderas. De entre ellas y como más significativas se estudiarán los siguientes casos:

a) Una medida de caudal y una válvula de control (uno o más quemadores).

b) Una medida de caudal y dos válvulas de control (uno o más quemadores por válvula).

c) Dos medidas de caudal y dos válvulas de control (uno o más quemadores por válvula).

a) Cuando la postcombustión se realiza mediante una válvula de control el control de combustible se podrá diseñar con un lazo PI simple como el que se muestra en la (Figura 3-81).

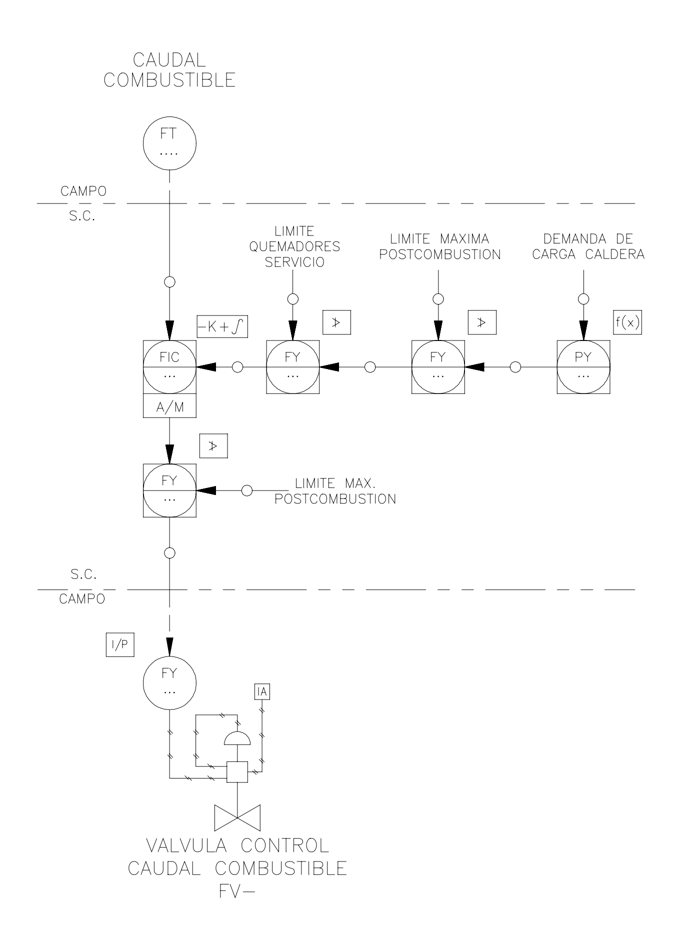


Figura 3-81. Control de combustible con una válvula de control

La demanda procedente del rango partido se utilizará de consigna del regulador de caudal cuya variable de proceso es el caudal de combustible. En el caso de que los quemadores excedan en capacidad la máxima permita en postcombustión, dicha consigna debe quedar limitada a la máxima cantidad de combustible aceptable para no exceder la aportación de calor en este modo de operación. Igualmente, para mayor seguridad, se debe limitar la máxima salida

del regulador de caudal para que incluso en modo manual no se pueda exceder dicha aportación. Por otra parte, la consigna del regulador debe ser también limitada por el número de quemadores en servicio, de forma que la demanda no sobrepase nunca la capacidad de fuego.

b) En instalaciones en las que la capacidad de la postcombustión es grande por motivos de incrementar el rango de control suelen instalarse dos válvulas de control. En estos casos, el lazo puede presentar distintas alternativas dependiendo de la configuración de los quemadores.

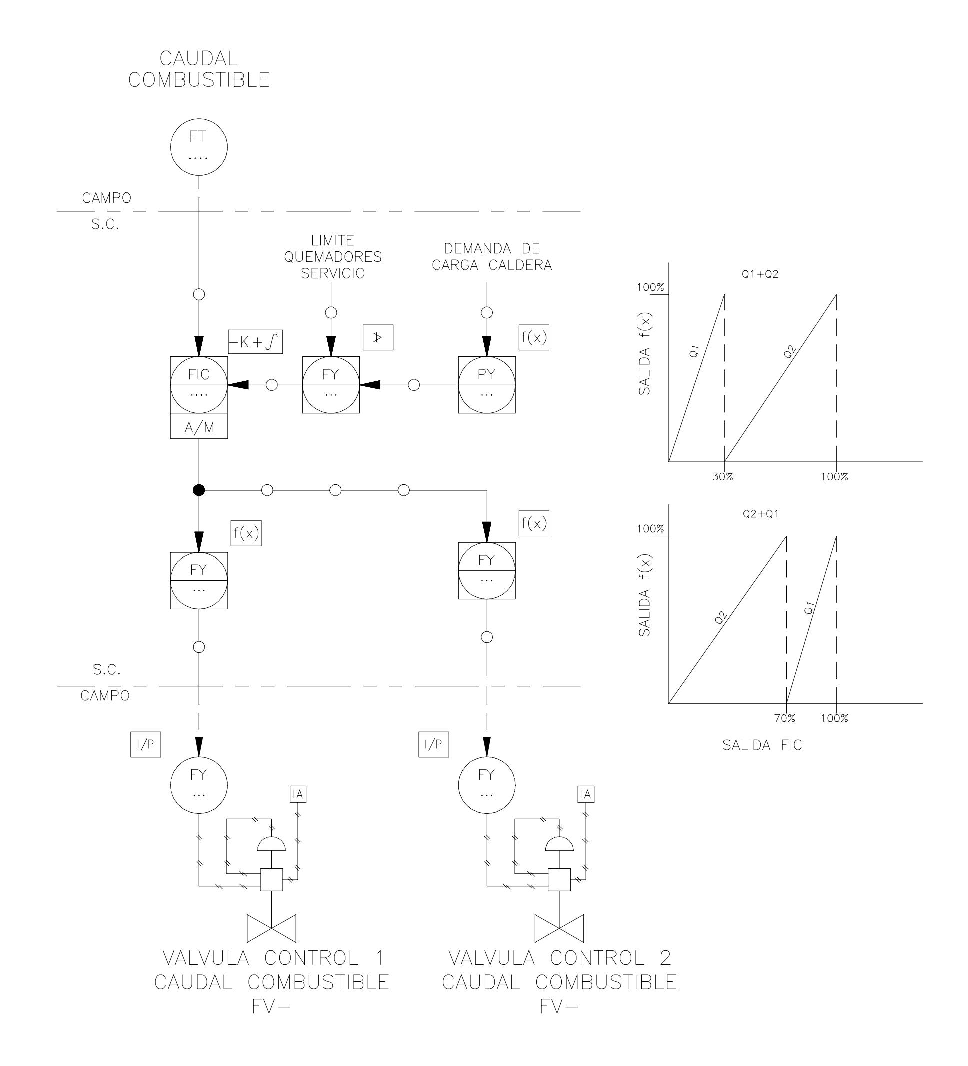


Figura 3-82. Dos válvulas de control en rango partido

En algunas instalaciones los quemadores se diseñan sólo para el ámbito de la postcombustión y su funcionamiento es secuencial, de forma que primero enciende uno y cuando ha llegado a su máxima capacidad enciende el siguiente. En estos casos, la salida del regulador de caudal se partirá y caracterizará de acuerdo con la capacidad de cada válvula de control y el orden

de encendido. En la Figura 3-82 se muestra un ejemplo de esta caracterización para el caso en el que las dos válvulas tengan distinta capacidad.

Sin embargo, en aquellas instalaciones en las que la necesidad del vapor es crítica, el sistema suele contar con la posibilidad de funcionamiento en modo aire fresco, cuya capacidad suele ser la misma que en modo gases de turbina. En este caso, al ser los quemadores de más potencia, es más frecuente que cada una de las válvulas de control tenga capacidad para toda la postcombustión y trabajen indistintamente como se muestra en Figura 3-83. Al igual que en el caso anterior, la demanda procedente del rango partido se utilizará de consigna del regulador. Como los quemadores exceden en capacidad la máxima permita en postcombustión dicha consigna debe quedar limitada, al igual que la máxima salida de cada estación auto/manual. En esta última limitación se debe considerar si sólo una o ambas válvulas de control están aportando combustible. La demanda a cada válvula de control se limitará de acuerdo al número de quemadores en servicio para no exceder la capacidad de aportación de calor.

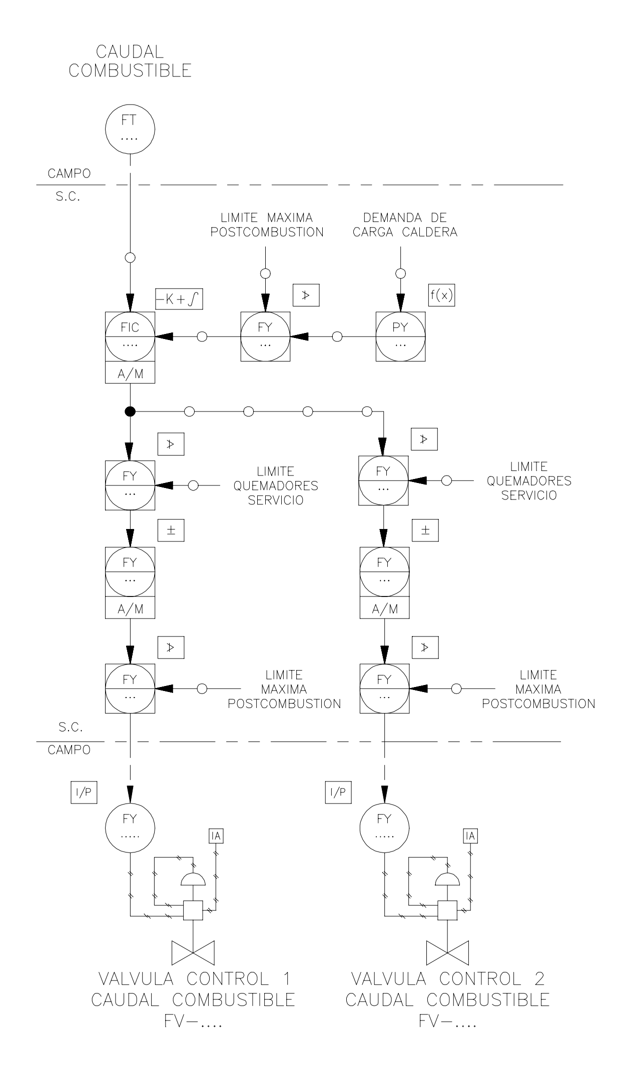


Figura 3-83. Dos válvulas de control indistintamente

Como ya se ha visto en el caso de las calderas industriales, este método presenta el problema de ganancia, de la respuesta ante disparos, etc.. Para solucionar este problema se incluirá un regulador de compensación como se ha visto ya anteriormente (Figura 3-84).

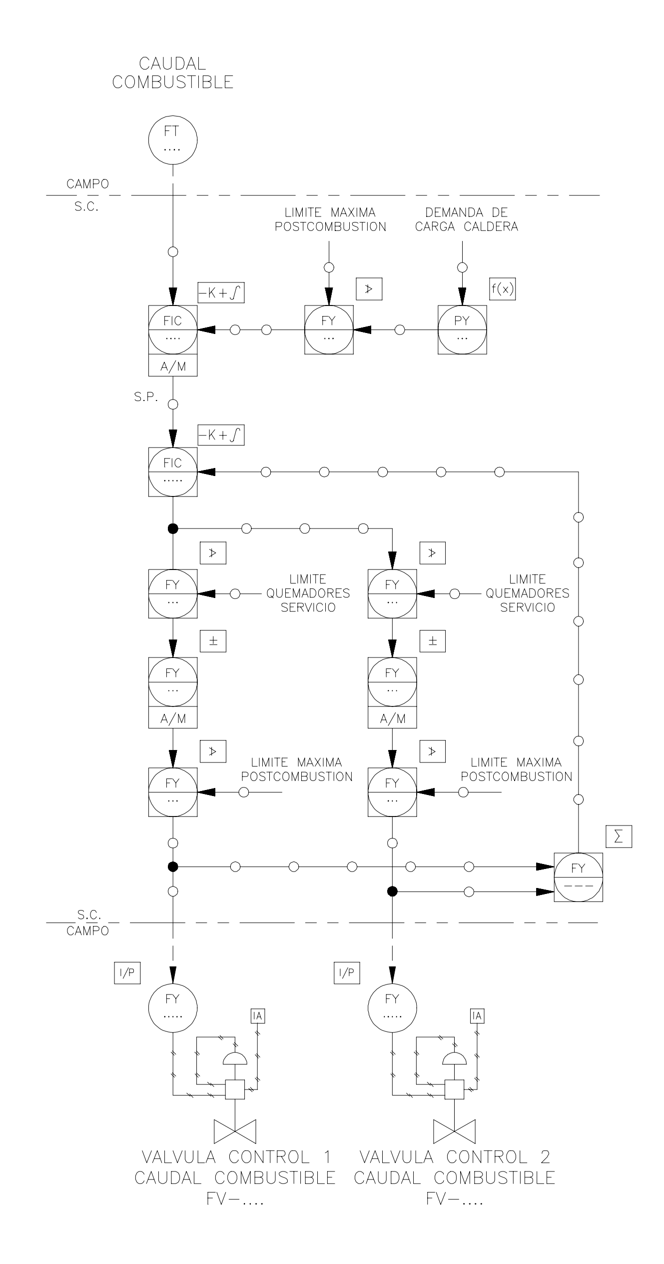


Figura 3-84. Compensación automática para dos válvulas de control

c) Puede interesar por motivos de distribución de calor o por cualesquiera otros, disponer de una medida de caudal independiente para cada válvula de control para asegurar los caudales por los distintos quemadores o mantener una relación entre ellos. La primera posibilidad sería sumar los dos caudales y, siendo la variable de proceso del regulador la salida de dicho sumador, usar una configuración igual a la indicada en la Figura 3-84. Una alternativa a este diseño se muestra en la Figura 3-85. Como se ve las medidas de caudal se suman y la salida del sumatorio se envía como variable de proceso de un

regulador de combustible total, que trabajará de forma análoga al de compensación del diseño anterior, cuya consigna será la demanda de combustible tras ser limitada para la postcombustión máxima. La salida de este regulador se enviará como consigna de los dos reguladores de caudal individuales, tras limitarse de acuerdo con el número de quemadores en servicio de cada una de las válvulas para no sobrepasarse la capacidad de fuego. Al igual que en los casos anteriores las salidas de los reguladores de caudal estarán limitadas para la máxima postcombustión. En este caso el límite debe tener en cuenta si ambas válvulas están aportando combustible o no.

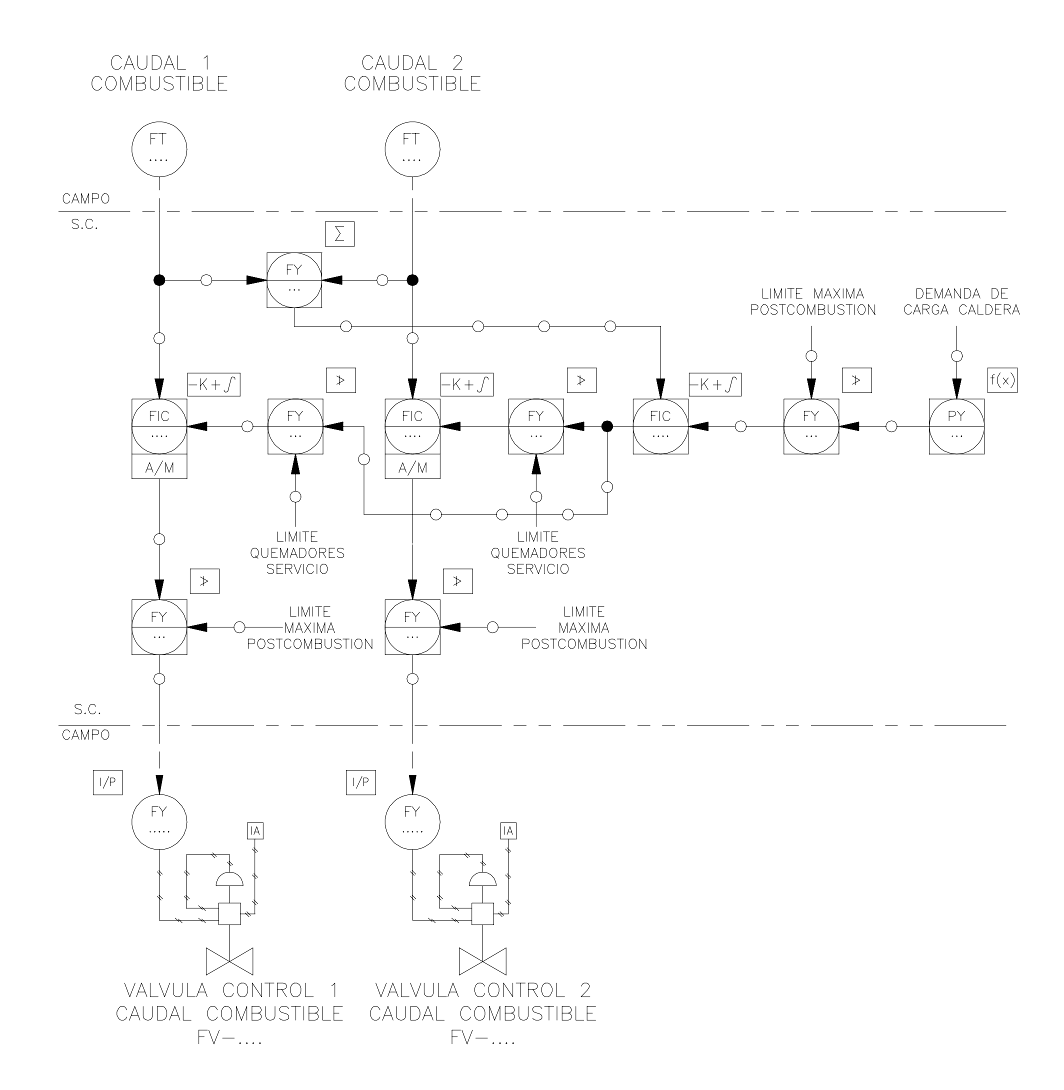


Figura 3-85. Dos válvulas con realimentación independiente

Con este diseño, al igual que con el anterior, la pérdida de un quemador o la manipulación en manual de una de las válvulas queda automáticamente compensada, ahora mediante el regulador de caudal total.

Cuando lo que se requiere es mantener una relación entre los caudales de las dos válvulas de control el diseño del lazo podría ser como el que se muestra en la Figura 3-86

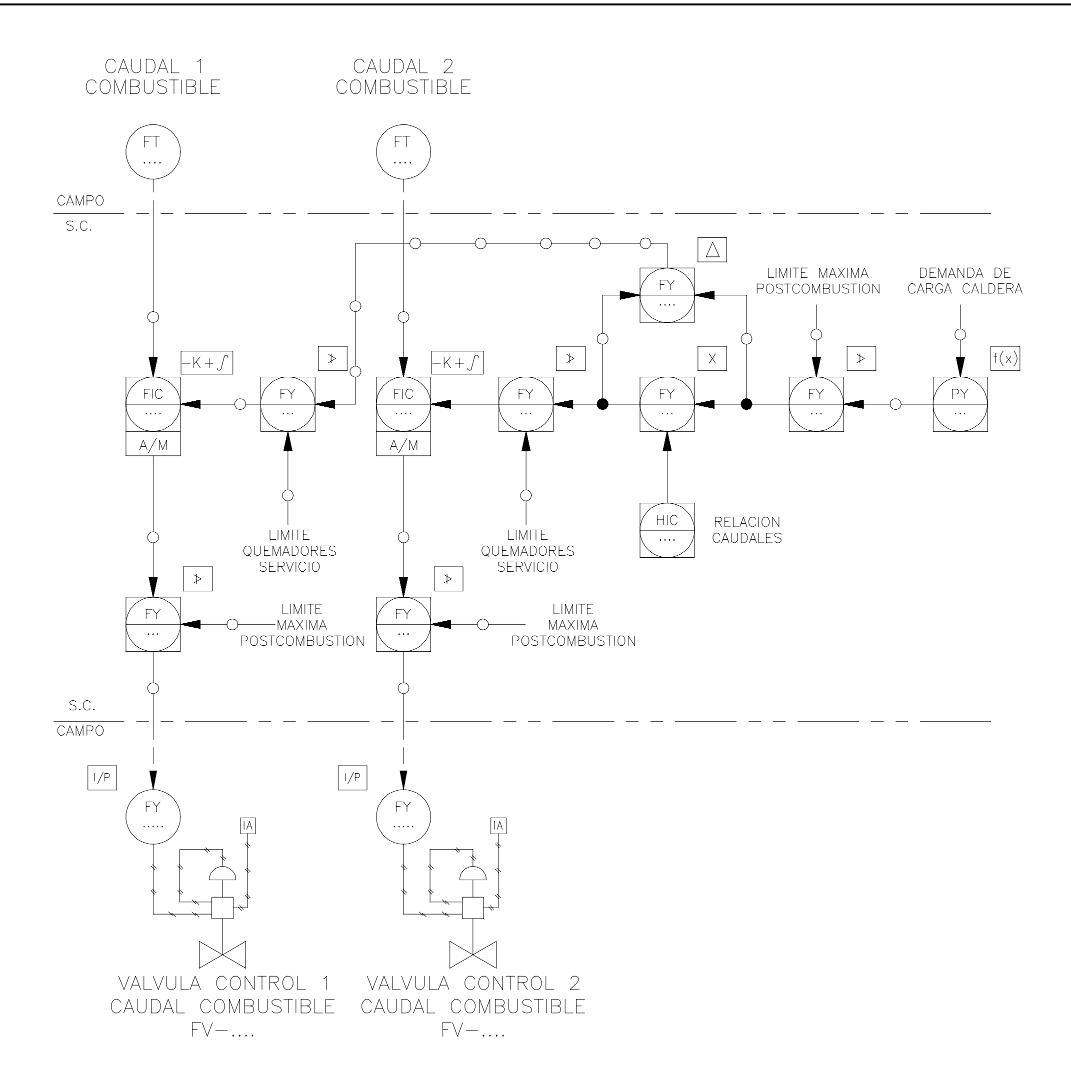


Figura 3-86. Alternativa dos válvulas con realimentación independiente

Esta configuración es análoga a la vista en el control de combustible de las calderas industriales. En ella, la señal de demanda de combustible tras ser limitada para la máxima postcombustión, se divide en dos de acuerdo con la relación deseada para ambas válvulas en la estación manual. Cada una de las señales se envía como consigna de sus respectivos reguladores tras limitarse de acuerdo con el número de quemadores en servicio de cada una de las válvulas. Las salidas de los reguladores de caudal estarán, como ya se ha dicho, limitadas para la máxima postcombustión admitida de forma que incluso en manual no se pueda sobrepasar este límite. Esta última limitación debe considerar si son una o dos las válvulas que aportan combustible.

Modo aire fresco

En algunas instalaciones, la caldera va provista de un ventilador de aire fresco que permite su operación aún en el caso de que la turbina de gas esté fuera de servicio.

Al ser este modo de operación sólo usado puntualmente ante problemas en la turbina de gas, y por no existir un cajón de aire que asegure la correcta

distribución de éste para todas las cargas y evite problemas en la distribución del calor, el ventilador de aire fresco no suele ir provisto de ningún tipo de modulación, sino que suministra una cantidad de aire constante que asegura la correcta combustión y distribución del calor. Esta aportación de aire sí suele ser modificada durante el verano y el invierno por la influencia de la temperatura en el caudal de aire.

Por otra parte, para poder suministrar todo la capacidad de vapor que tiene la caldera en este modo de operación, los quemadores deben ser dimensionados para tal circunstancia, lo que obviamente los sobredimensiona para el modo de gases turbina, creando las particularidades de limitación en la demanda vistas en el punto anterior.

Al ser entregada en este caso toda la aportación de calor por los quemadores la demanda de carga a la caldera vista en la Figura 3-78 debe ser modificada para su correcto funcionamiento en ambos modos de operación (Figura 3-87).

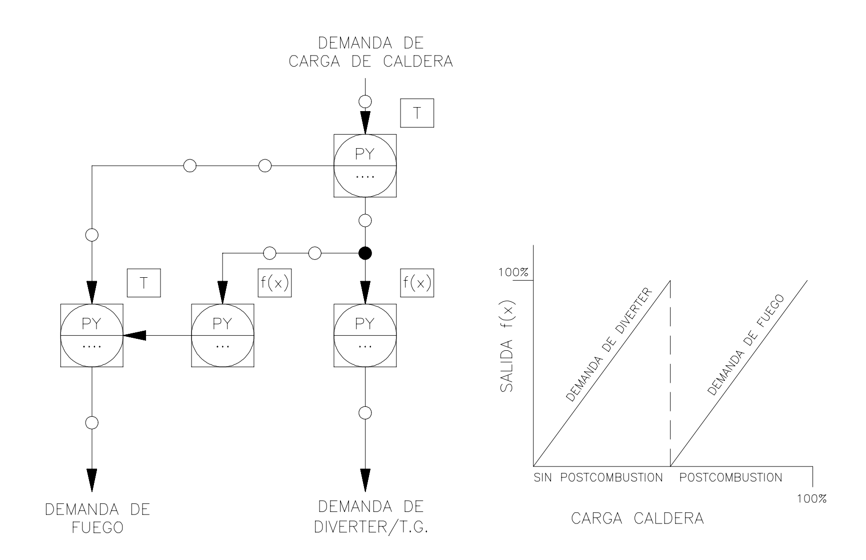


Figura 3-87. Demanda de caldera gases turbina/aire fresco

Mediante la inclusión de dos funciones de transferencia, que actúan de acuerdo con los modos de operación, se consigue generar la señal adecuada de combustible.

Enclavamientos

Como ya se ha dicho, el control de combustión de una caldera está estrechamente ligado al sistema de seguridades de la misma. Por este motivo existen diversos enclavamientos procedentes de éste que actúan sobre la configuración del control de combustión, como son los siguientes:

– Los reguladores de control de caudal de combustible se forzarán a su posición de encendido cuando no exista ningún quemador en servicio, de forma que la

válvula de control se encuentre en dicha posición cuando se va a realizar su encendido.

- El número de quemadores en servicio actuará sobre la estación manual que fija la relación entre los combustibles, de forma que exista congruencia entre los quemadores en servicio y la relación pedida.

- Igualmente, el número de quemadores en servicio fijará los límites en la demanda a sus respectivos reguladores en función de la carga máxima soportada por cada quemador.

- Las señales del modo de operación manipularán adecuadamente las funciones de transferencia en la demanda de carga.

Por otra parte, cuando todas las estaciones auto/manuales están en manual, los reguladores aguas arriba deben estar en modo seguimiento para que entren en control en el momento del paso de una de ellas a automático.

De forma análoga, si los reguladores de caudal están en manual el regulador de combustible total debe estar en modo seguimiento, o en manual si se prefiere.

4 PRACTICAS CON SIMULADORES

4.1 INTRODUCCION

FI Controles, S.A. ha desarrollado un Simulador de Calderas Industriales y un Simulador de Calderas de Recuperación de Calor, con fines educativos, destinado a instrumentistas, operadores de plantas y en general, a cualquier técnico relacionado con el diseño o uso de Calderas y sus Equipos Auxiliares.

El software que presentamos ha sido desarrollado con el objetivo de simular de la forma más real y completa posible todas las secuencias de encendido/apagado y los lazos de control de una Caldera de Recuperación de Calor (acuotubular), una caldera industrial y sus Equipos Auxiliares. Para ello se han seguido todas las recomendaciones de la norma NFPA 8506 en su última edición.

Todas las señales digitales y analógicas de la planta, tales como presiones, temperaturas, caudales, niveles, etc. se han simulado mediante algoritmos de control que interrelacionan las distintas variables, consiguiendo un comportamiento termodinámico de la Caldera casi real.

Desde la pantalla del PC es posible arrancar y operar la planta, desde su posición de parada total a la posición de plena carga en automático. Para ello el simulador dispone de unos completos menús de ayuda que guían al usuario menos experto de forma que los distintos pasos del arranque de la planta pueda realizarlos según unas secuencias lógicas reales, y así evitar el disparo de la caldera.

Algunos tiempos de estas secuencias han sido modificados para conseguir una mayor agilidad y rapidez de uso. Por ejemplo, las curvas de arranque de presión y temperatura de vapor se han acelerado de forma que sea posible alcanzar la presión nominal de trabajo en varios minutos y no en varias horas como ocurre en una instalación real.

Las operaciones principales que puede realizar el usuario son las siguientes:

- Arranque, parada y selección auto/manual de motores y turbinas.
- Apertura/cierre progresivo de válvulas manuales.
- Secuencias del BMS según se describe más adelante.
- Manejo de los lazos de control: cambio de parámetro P-I-D, cambio de consignas, selección manual/automático, apertura/cierre de la válvula de control, visualización de la arquitectura completa del lazo en formato ISA, etc.
- Visualización de curvas de tendencias reales e históricas.

- Alarmas: cambio de puntos de consigna en variables analógicas, visor del sumario de alarmas y de históricos, etc.

Todas las operaciones se realizarán exclusivamente con el ratón, pinchando en aquellos elementos con los que se puede interaccionar. Estos elementos están representados por un rectángulo cuando el puntero del ratón pasa sobre ellos. También es posible realizar todas las operaciones utilizando la tecla "TAB" junto con las teclas de "Flechas".

El software está basado en el SCADA InTouch y maneja 4300 variables (tags) y 84 pantallas.

4.2 COGENERACION-GUIA RAPIDA DE ARRANQUE

A continuación se detallan los pasos a seguir para realizar un encendido de la caldera, desde que se arranca el simulador hasta conseguir que la caldera esté estable.

Nombre de usuario

En primer lugar hay que introducir un nombre de usuario y una contraseña para poder usar el simulador. El nombre de usuario por defecto es "administrator" y la contraseña "simulador". Para hacerlo hay que pinchar sobre la función "Acceso". Este operador tiene un nivel de acceso máximo. Una vez introducido, el sistema nos permite una total libertad para visualizar cualquier ventana.

Reconocimiento de alarmas

Accionar el pulsador "Reconocer" situado en la parte inferior de la pantalla.

Modo de operación

Para el primer arranque de la caldera, es necesario seleccionar el modo de operación, para lo cual habrá que pulsar sobre los pulsadores de cambio de modo a Aire Fresco o a Modo Gases de Turbina. Al arrancar el simulador se selecciona el modo "Gases Turbina".

Llenado de caldera

Debe llenarse la caldera con agua previamente tratada hasta sobrepasar el nivel de alarma por bajo nivel del calderín y el de bajo nivel del desgasificador.

El agua de alimentación al calderín está suministrada por las bombas de agua de alimentación situadas en la pantalla "Sistema de Agua". Por lo tanto, hay que arrancar por lo menos una bomba. Para poder arrancar una bomba es necesario que no haya nivel bajo en el desgasificador (en un primer momento está vacío). Para llenar el desgasificador hay que realizar los siguientes pasos.

- Arrancar dos bombas de condensados (A y B). Con esto se consigue presión de agua en la tubería que se dirige al desgasificador. Se ajusta la presión de agua mediante el lazo de control correspondiente. La presión normal de trabajo es de 5 bar.
- Abrir la válvula de control situada a la entrada del desgasificador.
- Cuando el nivel del desgasificador esté alrededor del 50% se puede poner el lazo correspondiente a esta válvula en automático con un punto de consigna del 50%.

Una vez sobrepasado el nivel de alarma del desgasificador se puede arrancar una bomba de agua de alimentación (A o B). Con esto se conseguirá presión de agua a la salida de las mismas.

El último paso a realizar es el de abrir un poco la válvula de control de agua de alimentación situada en la pantalla "Caldera". La apertura de esta válvula permite el paso del agua al calderín. El punto de consigna de "Muy bajo nivel en calderín" está situado en -200 mm. Hay que incorporar agua hasta que sobrepase este punto. Los puntos de consignas de nivel se pueden modificar en la pantalla de ajuste de alarmas pinchando sobre la medida de nivel.

El valor normal del nivel en el calderín es 0 mm. Cuando el nivel se encuentre alrededor de este nivel hay que cerrar la válvula de control. El nivel del calderín se puede bajar abriendo las válvulas de control correspondientes a la purga continua del calderín situadas en la pantalla "Auxiliar".

Puesta en servicio de la turbina de gas

El estado de la turbina de gas se observa pinchando sobre la indicación de Turbina en Servicio, situada al comienzo de la caldera, ante lo cual aparece la ventana "Turbina de Gas". El arranque de la turbina se realiza pulsando en el botón de arrancar.

Una vez terminada la secuencia de arranque de la turbina de gas, ésta quedará sincronizada al mínimo de carga (25%).

Apertura del diverter.

El siguiente paso será el de abrir el diverter para hacer pasar los gases procedentes de la turbina de gas a través de la caldera y comenzar con el calentamiento y la subida de presión de la misma.

Para poder abrir el diverter hay que pinchar en la medida de la apertura del mismo para acceder a la ventana del lazo de control de combustión donde se encuentra la estación auto/manual del mismo. Para poder accionar sobre el pulsador de abrir diverter es necesario tener cumplida la señal “Permiso Apertura Diverter”. Pinchando sobre ella aparece un listado de todas las condiciones que se deben cumplir. Las que no se cumplen son las siguientes:

- Condición de cierre diverter. Pinchando sobre la indicación aparecerán las condiciones de cierre del diverter. Las que no se cumplen son las siguientes:

- Presión de aire de refrigeración muy baja. Para conseguir presión basta con arrancar uno de los ventiladores de aire de refrigeración situados en la pantalla “Caldera”.

- Presión de aire de sellado muy baja. Para conseguir presión basta con arrancar uno de los ventiladores de aire de sellado situados en la pantalla “Caldera”.

- Caldera Rearmada. Para rearmar la caldera basta con acceder a la ventana “Mando BMS” pinchando sobre el pulsador adecuado en la pantalla “Caldera” o bien pinchando sobre la indicación en la pantalla de permisos. En la ventana “Mando BMS” hay que accionar el pulsador “Rearmar Caldera”.

Una vez cumplidas todas las condiciones se puede proceder a abrir el diverter.

Subida de presión en la caldera mediante gases de turbina

En una planta real la subida de carga de la caldera, deberá realizarse siguiendo una curva más lenta de lo que permite la presente aplicación. En ella se ha acelerado la velocidad de incremento de las temperaturas y presiones en el arranque con el objetivo de agilizarlo.

En modo Gases de Turbina, habrá que ir abriendo lentamente el diverter en caso de tener gases de turbina calientes y la caldera fría, para evitar un choque térmico en la misma.

Para comprobar la velocidad de calentamiento de la caldera se pueden consultar las temperaturas en el metal del calderín situadas en la pantalla "Auxiliar".

Ajuste de presión en el calderín

El siguiente paso va a ser ajustar la presión en el calderín a un valor situado alrededor de 24 bar. Para poder hacerlo hay que utilizar la válvula de venteo situada en la línea de vapor. Abriendo o cerrando esta válvula (pantalla "Caldera") se consigue equilibrar la presión en el calderín a un valor determinado. Es necesario, al mismo tiempo, comprobar la medida del nivel del calderín y si es necesario abrir la válvula de agua de alimentación para evitar un descenso del mismo. Si se desea se puede poner en automático el lazo de control de nivel.

En modo Aire Fresco, si no se tienen dos quemadores en servicio, el siguiente paso va a ser encender el otro quemador de gas natural. Después de esto, hay que volver a mover la válvula de venteo para evitar la subida de presión en el calderín.

Subida de presión en el colector de vapor

Lo primero que hay que realizar es presurizar el colector de vapor. Para ello se utiliza la válvula manual de corte principal de vapor situada en la ventana

"Caldera". Debido a que la diferencia de presión entre el colector y la salida de la caldera es grande, será necesario abrir lentamente esta válvula hasta que las presiones se igualen. En ese momento, se puede abrir completamente la válvula manual.

El siguiente paso es incrementar la presión en el colector hasta el valor de 22 bar. Para ello se utilizará la señal de salida de la estación Auto/Manual del diverter. Una vez equilibrado el colector al valor de 22 bar (o al valor que marque el punto de consigna del lazo) estará en condiciones de ponerse en automático tanto la estación auto/manual como el controlador master de presión.

Vapor a desgasificador y turbinas

Del colector de vapor se obtiene el vapor empleado para:

– Demanda de vapor a planta.

– Alimentación al desgasificador. A través de una válvula de control.

– Alimentación a turbinas de vapor. Existen dos turbinas (bombas agua alimentación y bombas de condensado) que utilizan el vapor procedente del colector. Estas bombas no se pueden poner en servicio hasta que no se presurice el colector de vapor.

Demanda de vapor a planta

Una vez equilibrada la presión en el colector principal al valor indicado en la consigna del lazo de control se puede comenzar a suministrar vapor a planta. Para hacerlo solamente hay que pinchar sobre la indicación "Vapor a planta". Al pinchar sobre esta indicación aparece una ventana que permite modificar la cantidad de demanda de vapor. Cada vez que se modifique este valor, la presión en el colector se modificará y provocará un movimiento de todos los elementos de control de la caldera para volver a la situación de equilibrio. El rango de esta demanda viene determinado de 0 a 100 %. 75 % significa la máxima demanda que puede soporta caldera al máximo (producción de 50 T/h).

Si se incrementa el valor de la demanda, será necesario poner en servicio los dos quemadores en modo Aire Fresco, o un quemador en modo Gases de Turbina con el objeto de poder suministrar toda la cantidad de vapor requerida por la demanda.

Purga de caldera

El primer paso a realizar para lograr el encendido del quemador y liberar a la turbina de gas de su limitación de carga es la secuencia de purga de la misma. Para poder realizarla se deben cumplir todos los permisos indicados en la ventana correspondiente. Los permisos que no se cumplen en un principio son:

– No hay condiciones de disparo MFT. Pinchando en esta indicación aparecerá la ventana de condiciones de disparo MFT. Las que no se cumplen son las siguientes:

– Muy baja presión de aire de instrumentos. Para dar aire de instrumentos basta con abrir la válvula manual correspondiente situada en la pantalla "Caldera". En el momento en que se empiece a abrir, la presión se incrementará hasta el valor apropiado.

– Diverter no abierto o en posición de purga. Para cumplir esta condición lo único que hay que hacer es abrir el diverter hasta la posición de purga o mayor (75%).

En cuanto se cumplan todos los permisos de purga, ésta arrancará automáticamente.

La purga se realizará en un minuto y medio. Al acabar se encenderá la indicación "Purga Completa".

Encendido del piloto

Para encender los quemadores o para realizar un cambio de modo será necesario que el piloto se encuentre en servicio. Una vez que hay presión de suministro en el colector de gas natural, y se cumplan el resto de permisos necesarios para encender el piloto, bastará con pinchar sobre "Mando BMS" y accionar el pulsador de encendido del piloto.

Una vez terminada la secuencia de encendido del piloto, éste quedará en servicio.

Encendido quemadores de gas natural

En modo Aire Fresco, una vez encendido el piloto, se deberá encender algún quemador de gas. Para hacerlo, basta con pinchar sobre la ventana "Mando BMS" y accionar el correspondiente pulsador.

Una vez terminada la secuencia de encendido del quemador de gas, éste quedará en servicio.

En este punto ya se tiene un quemador de gas aportando calor a la caldera, por lo que a partir de este momento, en modo Aire Fresco, la temperatura en el calderín empezará a incrementarse lentamente. Ahora podemos elegir, o bien subir presión con un sólo quemador o bien encender el otro quemador para acelerar la subida de presión. Realmente, en todas las calderas, la subida de presión deberá de hacerse lentamente para conseguir un calentamiento uniforme de la misma. Al igual que en modo Gases de Turbina, para comprobar la velocidad de calentamiento de la caldera se pueden consultar las temperaturas en el metal del calderín situadas en la pantalla "Auxiliar".

Si la caldera está funcionando en modo Gases Turbina, únicamente podrá ser puesto en servicio un quemador accionando su correspondiente pulsador de encendido situado en la pantalla “Mando BMS”.

Una vez encendido el quemador de gas natural puede ponerse en automático su lazo de control.

Temperatura de vapor principal

Para poder colocar el lazo de control de temperatura de vapor principal en automático se debe acceder a la pantalla del lazo, para lo cual habrá que pinchar sobre la válvula de control correspondiente situada en la pantalla "Caldera", a través de la pantalla "Menú Control".

A continuación se muestran las pantallas principales de que consta el simulador de calderas de recuperación de calor.

4.3 CALDERA INDUSTRIAL-GUIA RAPIDA DE ARRANQUE

A continuación se detallan los pasos a seguir para realizar un encendido de una de las calderas, desde que se arranca el simulador hasta conseguir que la caldera esté estable.

Nombre de usuario

En primer lugar hay que introducir un nombre de usuario y una contraseña para poder usar el simulador. El nombre de usuario por defecto es "administrator" y la contraseña "simulador". Para hacerlo hay que pinchar sobre la función "Acceso". Este operador tiene un nivel de acceso máximo. Una vez introducido, el sistema nos permite una total libertad para visualizar cualquier ventana.

Reconocimiento de alarmas

Accionar el pulsador "Reconocer" situado en la parte inferior de la pantalla.

Llenado de la caldera

Debe llenarse la caldera con agua previamente tratada hasta sobrepasar el nivel de alarma del calderín.

El agua de alimentación al calderín está suministrada por las bombas de agua de alimentación situadas en la pantalla "Sistema de Agua". Por lo tanto, hay que arrancar por lo menos una bomba. Para poder arrancar una bomba es necesario que no haya nivel bajo en el desgasificador (en un primer momento está vacio). Para llenar el desgasificador hay que realizar los siguientes pasos.

– Arrancar por lo menos una de las bombas de condensados (A o D). Con esto se consigue presión de agua en la tubería que se dirige al desgasificador.

- Abrir la válvula de control situada a la entrada del desgasificador.

- Cuando el nivel del desgasificador esté alrededor del 50% se puede poner el lazo correspondiente a esta válvula en automático con un punto de consigna del 50%.

Una vez lleno el desgasificador se puede arrancar una bomba de agua de alimentación (D o E). Con esto se conseguirá presión de agua a la salida de las mismas.

El último paso a realizar es el de abrir un poco la válvula de control de agua de alimentación situada en la pantalla "Caldera". La apertura de esta válvula permite el paso del agua al calderín. El punto de consigna de "Muy bajo nivel en calderín" está situado en -150 mm. Hay que incorporar agua hasta que sobrepase este punto. Los puntos de consignas de nivel se pueden modificar en la pantalla de ajuste de alarmas pinchando sobre la medida de nivel.

El valor normal del nivel en el calderín es 0 mm. Cuando el nivel se encuentre alrededor de este nivel hay que cerrar la válvula de control. El nivel del calderín se puede bajar abriendo las válvulas de control correspondientes a la purga continua del calderín situadas en la pantalla "Auxiliar".

Purga de caldera

El primer paso a realizar para lograr el encendido de la caldera es la secuencia de purga de la misma. Para poder realizarla se deben cumplir todos los permisos indicados en la ventana correspondiente. Los permisos que no se cumplen en un principio son:

- Ventilador de tiro forzado parado. Hay que arrancar por lo menos uno de los ventiladores mediante su ventana de arranque. Es necesario cerrar la compuerta de aspiración de un ventilador antes de poder arrancarlo.

- No bajo caudal de aire de combustión. Para conseguir un caudal mínimo de aire hay que abrir la compuerta de aspiración del ventilador que esté en marcha. Para hacerlo hay que pinchar en la indicación de apertura de la compuerta accediendo a la pantalla del lazo de combustión. En esta pantalla hay que modificar el valor de la estación auto/manual hasta conseguir que el permiso aparezca. El punto de consigna se modifica en la pantalla de ajuste de alarmas pinchando sobre la señal de caudal de aire.

Una vez conseguidos todos los permisos basta con pinchar sobre el pulsador "Arrancar Purga" situada en la pantalla "BMS". La purga se realizará en dos minutos. Al acabar se encenderá la indicación "Purga 100%".

Rearme de caldera

El siguiente paso a realizar es el rearme de la caldera. Para poder rearmar la caldera es necesario que no existan condiciones de disparo de la misma. El único disparo presente en este momento es el de:

Muy baja presión de aire de instrumentos. Para dar aire de instrumentos basta con abrir la válvula manual correspondiente situada en la pantalla "Caldera". En el momento en que se empiece a abrir, la presión se incrementará hasta el valor apropiado.

Una vez que la caldera se encuentra sin condiciones de disparo hay que pinchar sobre el pulsador "Rearmar" situado en la pantalla "BMS". Con esta acción desaparece la señal "Caldera disparada".

Test de fugas de gas natural

Antes de poder encender un quemador con gas natural es necesario realizar el test de fugas del colector. Para hacer basta con pinchar sobre el pulsador "Arrancar Test de Fugas Gas". Durante la secuencia del test de fugas se visualiza el tiempo que lleva en cada uno de los pasos.

Encendido quemadores de gas natural

Una vez realizado el test de fugas del colector de gas ya se tienen todos los permisos necesarios para encender el primer quemador de gas. Para hacerlo, basta con pinchar sobre el quemador y accionar el correspondiente pulsador situado en la ventana de mando del quemador.

Una vez terminada la secuencia de encendido del quemador de gas, éste quedará en servicio.

En este punto ya se tiene un quemador de gas aportando calor a la caldera, por lo que a partir de este momento la presión en el calderín empezará a incrementarse lentamente. Ahora podemos elegir, o bien subir presión con un sólo quemador (lento) o bien encender algún quemador más para acelerar la subida de presión. Realmente, en todas las calderas, la subida de presión deberá de hacerse lentamente para conseguir un calentamiento uniforme de la misma. Para comprobar la velocidad de calentamiento de la caldera se pueden consultar las temperaturas en el metal del calderín situadas en la pantalla "Auxiliar".

Ajuste de presión en el calderín

El siguiente paso va a ser ajustar la presión en el calderín a un valor situado alrededor de 20 bares. Para poder hacerlo hay que utilizar la válvula de venteo situada en la línea de vapor. Abriendo o cerrando esta válvula (pantalla "Caldera") se consigue equilibrar la presión en el calderín a un valor determinado. Si se tiene un sólo quemador, la presión se equilibra aproximadamente sobre un 15% de apertura de la válvula. Es necesario, al mismo tiempo, comprobar la medida del

nivel del calderín y si es necesario abrir la válvula de agua de alimentación para evitar un descenso del mismo. Si se desea se puede poner en automático el lazo de control de nivel (FIC-236 y LIC-076).

Si no se tienen dos quemadores en servicio, el siguiente paso va a ser encender un segundo quemador de gas natural. Después de esto, hay que volver a mover la válvula de venteo para evitar la subida de presión en el calderín.

Controladores de aire y combustible

Con la presión en el calderín estable y con dos quemadores de gas natural en servicio, vamos a proceder a poner en automático los controladores de aire y gas natural.

El primer paso será poner en automático el controlador de caudal de aire de combustión (FIC-781). Parar hacerlo hay que seguir los siguientes pasos:

- Modificar la salida del controlador hasta un valor del 25% (igualar la salida de la estación auto/manual del ventilador que hay en servicio).

- Poner la estación auto/manual del ventilador en automático.

- Poner el controlador de aire (FIC-781) en automático.
-
- Poner el controlador de exceso de Oxigeno (AIC-800) en automático.

En este momento se puede poner el controlador de caudal de gas (FIC-510) en automático.

A partir de aquí se puede modificar la cantidad de combustible moviendo la salida del controlador master de presión.

Master de presión

Lo primero que hay que realizar es presurizar el colector principal de vapor. Para ello se utiliza la válvula manual de corte principal de vapor de la caldera situada en la ventana "Colector de vapor". Debido a que la diferencia de presión entre el colector y la salida de la caldera es grande, será necesario abrir lentamente esta válvula hasta que las presiones se igualen. En ese momento, se puede abrir completamente la válvula manual.

El siguiente paso es incrementar la presión en el colector hasta el valor de 18.5 bares. Para ello se utiliza la señal de salida de la estación auto/manual correspondiente a la caldera. Incrementando esta señal se le dará una señal de demanda mayor al lazo de combustión y por lo tanto incrementará la presión en el colector. Una vez equilibrado el colector al valor de 18.5 (o al valor que marque el punto de consigna del lazo) se deben realizar los siguientes pasos para ponerlo en automático.

- Poner en automático el controlador PIC-030B si no lo estuviera ya.

- Modificar la salida del controlador "Master de Presión" (PIC-030A) hasta que se iguale la entrada de la estación auto/manual con la salida.

- Poner en automático la estación auto/manual de la caldera 1 (HIC-030-1).

- Poner en automático el controlador PIC-030A.

Vapor auxiliar

El siguiente paso va a ser poner en servicio el colector de vapor auxiliar. Este vapor se utiliza para:

- Alimentación al desgasificador. A través de una válvula de control.

- Alimentación a turbinas de vapor. Existen varias turbinas (bombas agua alimentación, bombas condensador y bombas fuel oil) que utilizan el vapor procedente de este colector. Estas bombas no se pueden poner en servicio si no se presuriza el colector de vapor auxiliar.

- Alimentación al grupo de calentamiento de fuel oil. De este punto también se saca el vapor utilizado para calentar el fuel oil.

Para presurizar el colector se utiliza una válvula manual. Debido a que en este momento la diferencia entre el colector de vapor principal y el de vapor auxiliar es grande será necesario abrir lentamente la válvula manual.

Por último se debe de poner en automático el lazo de control de la presión al desgasificador. Para hacerlo hay que pinchar en la válvula de control correspondiente y seleccionar la opción "Auto".

Demanda de vapor a planta

Una vez equilibrada la presión en el colector principal al valor indicado en la consigna del lazo de control se puede comenzar a suministrar vapor a planta. Para hacerlo solamente hay que pinchar sobre la indicación "Vapor a planta". Al pinchar sobre esta indicación aparece una ventana que permite modificar la cantidad de demanda de vapor. Cada vez que se modifique este valor, la presión en el colector se modificará y provocará un movimiento de todos los elementos de control de la caldera para volver a la situación de equilibrio. El rango de esta demanda viene determinado de 0 a 100 %. 100 % significa la máxima demanda que pueden soportar las dos calderas al máximo.

Si se incrementa el valor de la demanda demasiado, será necesario poner en servicio más quemadores con el objeto de poder suministrar toda la cantidad de vapor requerida por la demanda. Por la misma razón es posible que se deba poner en servicio el otro ventilador de tiro forzado si la demanda de carga así lo

requiera. Para poder arrancar el segundo ventilador será necesario cerrar su compuerta de aspiración.

Temperatura de vapor final

Para poder colocar el lazo de control de temperatura de vapor principal en automático es preciso arrancar antes por lo menos una de las bombas de atemperación mediante su ventana de mando. Estas bombas están situadas en la pantalla "Caldera".

En este momento se puede poner en automático el lazo de control de temperatura de vapor principal. Para acceder a la pantalla del lazo basta con pinchar sobre la válvula de control correspondiente situada en la pantalla "Caldera".

Llegados a este punto, con los lazos principales de la caldera en automático, el colector de vapor en automático y estable se puede proceder a cerrar la válvula de venteo.

A partir de aquí se pueden ir poniendo en servicio todos los demás lazos de control de que dispone la caldera.

Quemadores de fuel oil

Para poder utilizar el fuel oil en los quemadores será necesario realizar los siguientes pasos:

- Arrancar por lo menos una de las bombas de fuel oil. El colector de fuel oil se ajustará automáticamente al valor de 25 bar debido a que el lazo de control de presión de fuel oil se encuentra en automático.

- Poner en automático el lazo de control de temperatura de fuel oil. A este lazo se accede pinchando sobre la válvula de control que aporta vapor a los calentadores de fuel oil. Este punto de consigna está situado en 110 ºC.

- Recircular fuel oil abriendo la válvula de circulación situada en la pantalla "BMS". Para hacerlo basta con pinchar sobre la válvula y accionar el pulsador correspondiente. Después de un tiempo de circulación se lograrán las condiciones de temperatura de fuel oil requeridas para el encendido.

- Realizar el test de fugas del colector de fuel oil. Es una condición para encender.

- Poner en automático el lazo de control de presión diferencial vapor/fuel oil. Al lazo se accede pinchando sobre la válvula de control de vapor de atomización.

- Encender un quemador de fuel oil (si se cumplen todos los permisos).

Cambio de combustible

Si se quiere cambiar el tipo de combustible a utilizar en la caldera hay que realizar los siguientes pasos (de gas a fuel oil):

– Se dispone de por lo menos dos quemadores de fuel oil en servicio.

– Se pone en automático el lazo de control de caudal de fuel oil (FIC-466).

Se cambia la dirección de la demanda de combustible modificando el valor de la variable "Porcentaje de fuel oil" situada en la pantalla del lazo de combustión. Según se cambia esta variable desde 0 hasta 100 se va incrementando la demanda de fuel oil y se decrementa la de gas natural. Cuando esta variable vale 100 indica que toda la demanda irá hacia el fuel oil. En este momento se pueden apagar los quemadores de gas natural.

A continuación se muestran las pantallas principales de que consta el simulador de calderas industriales.



Figura 4-1. Pantalla de inicio

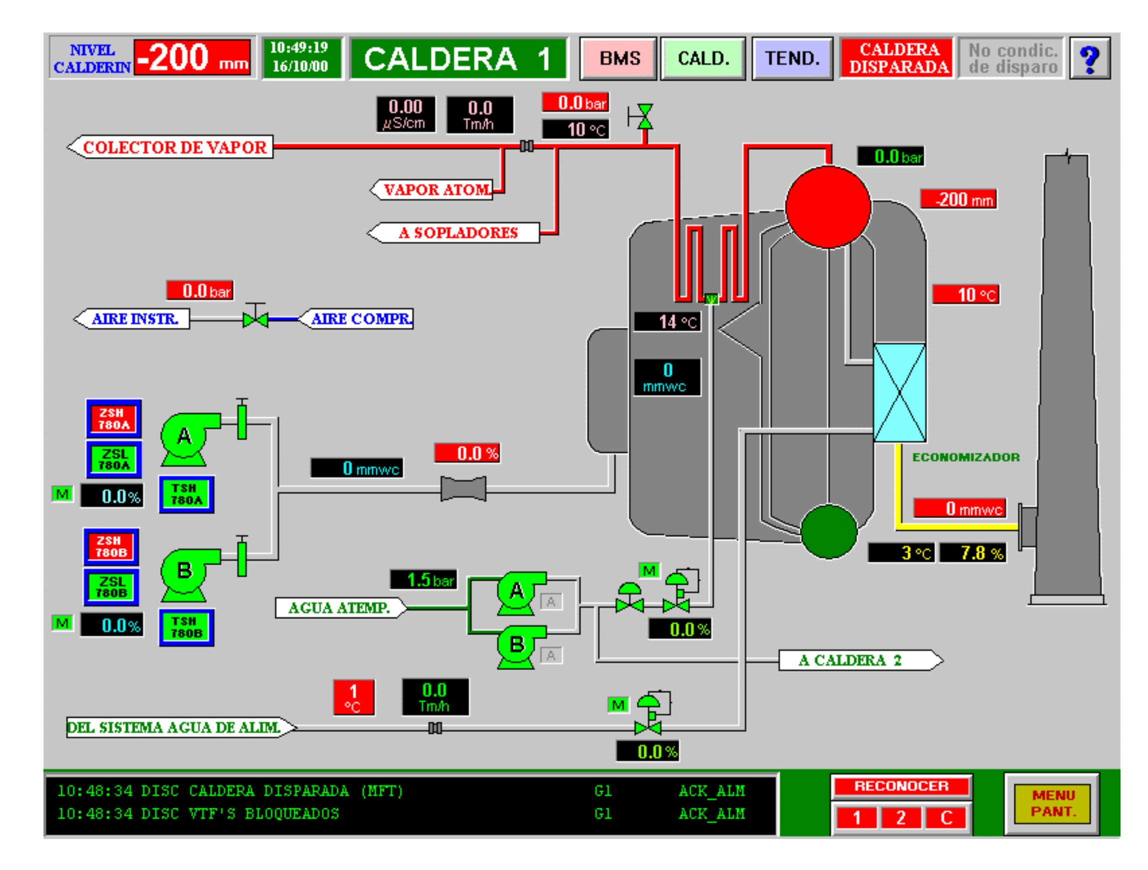


Figura 4-2. Circuitos agua-vapor y aire-gases

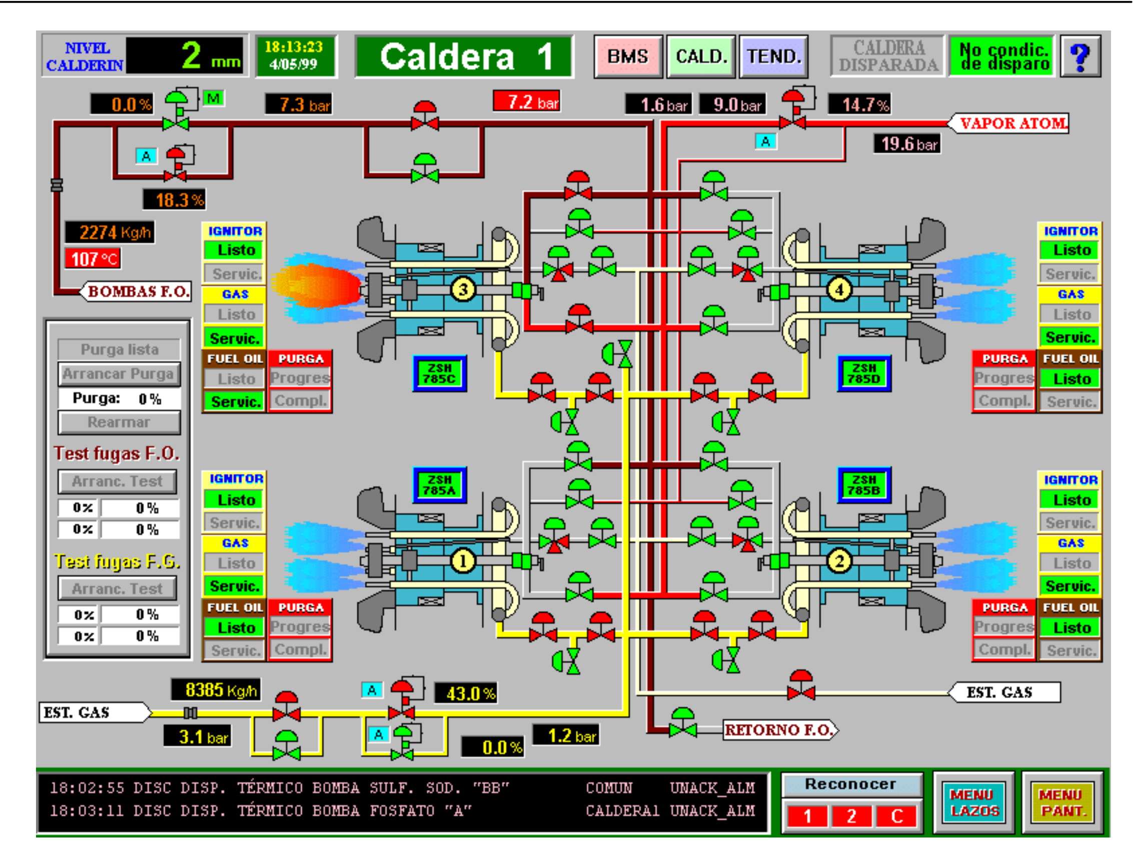


Figura 4-3. Circuito combustibles

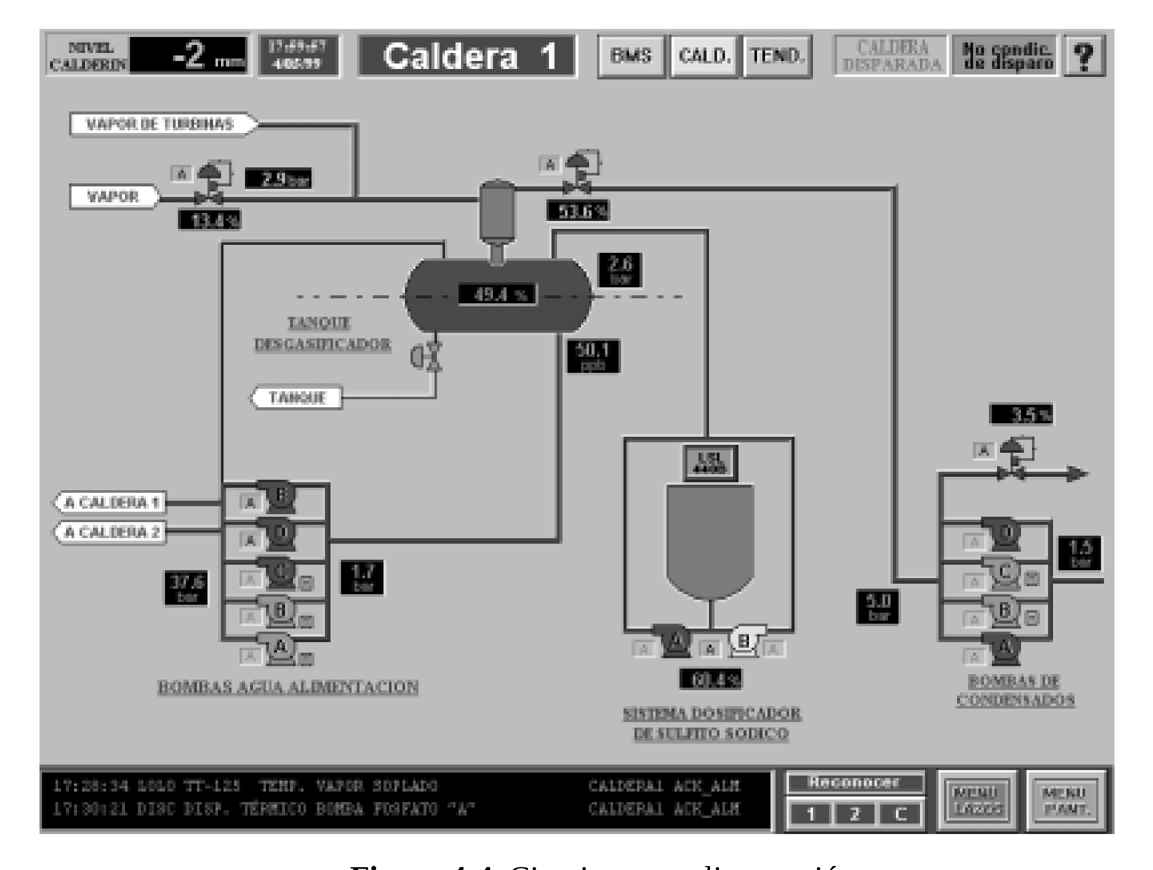


Figura 4-4. Circuito agua alimentación

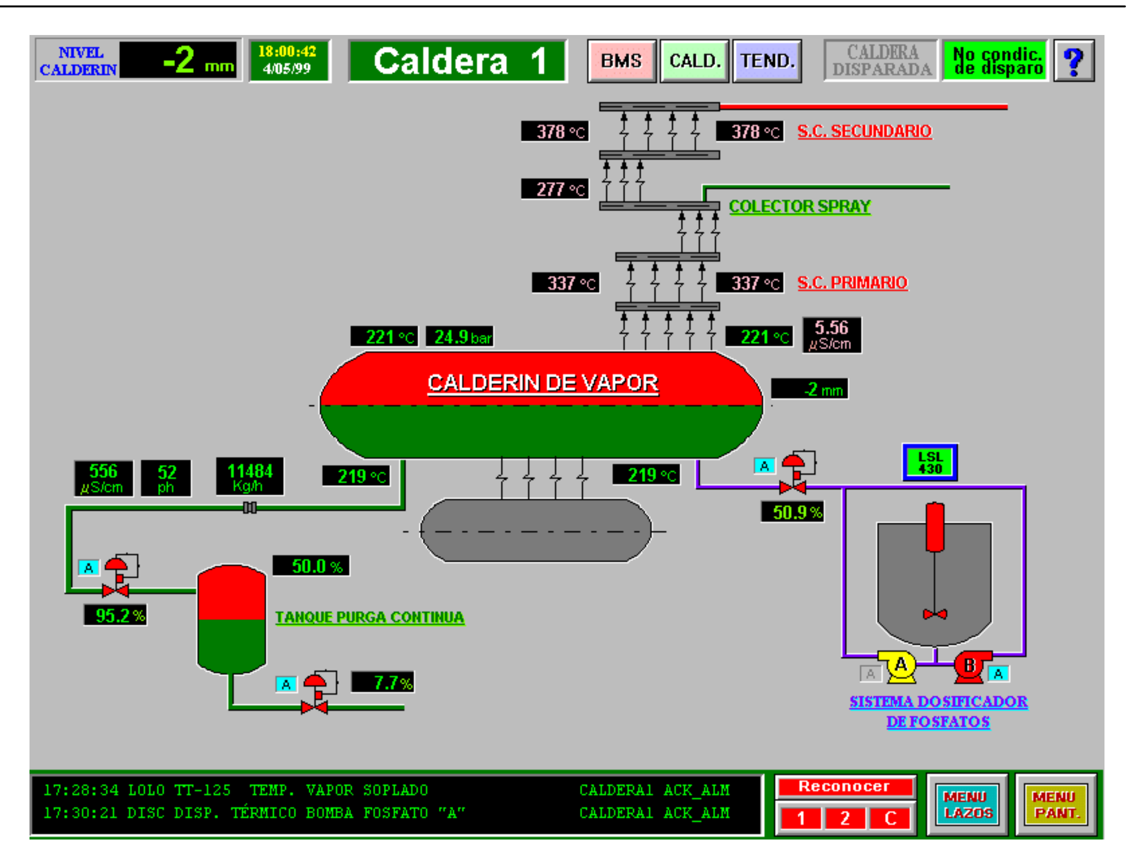


Figura 4-5. Detalle circuito agua-vapor

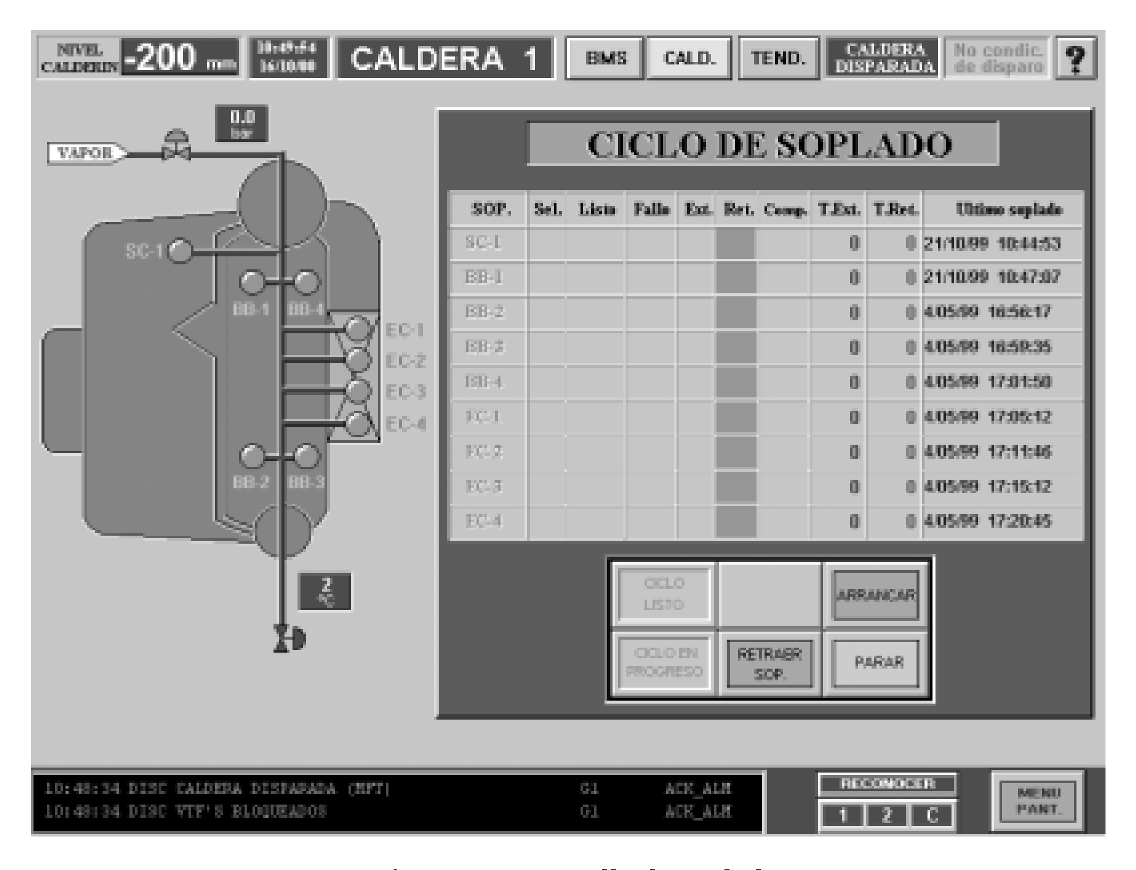


Figura 4-6. Pantalla de sopladores

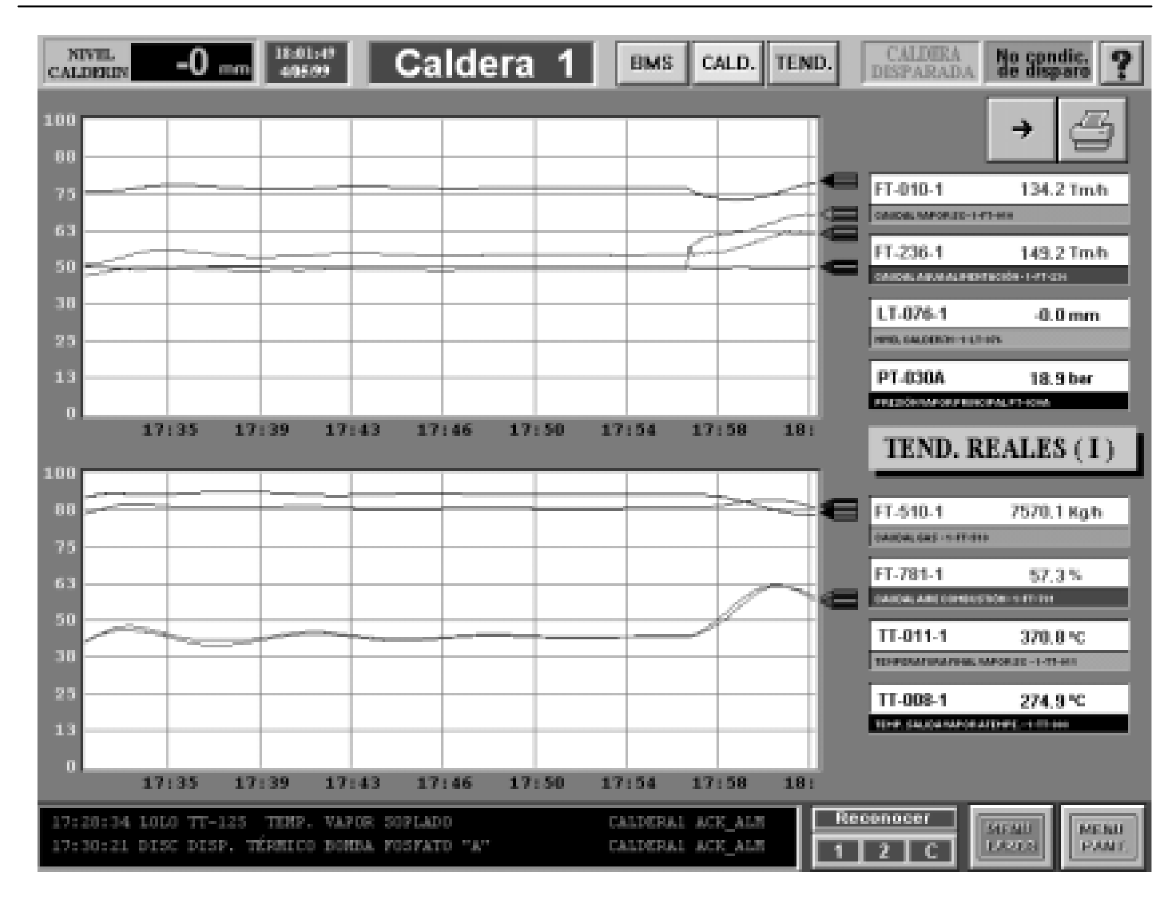


Figura 4-7. Pantalla de tendencias



Figura 4-8. Pantalla de alarmas

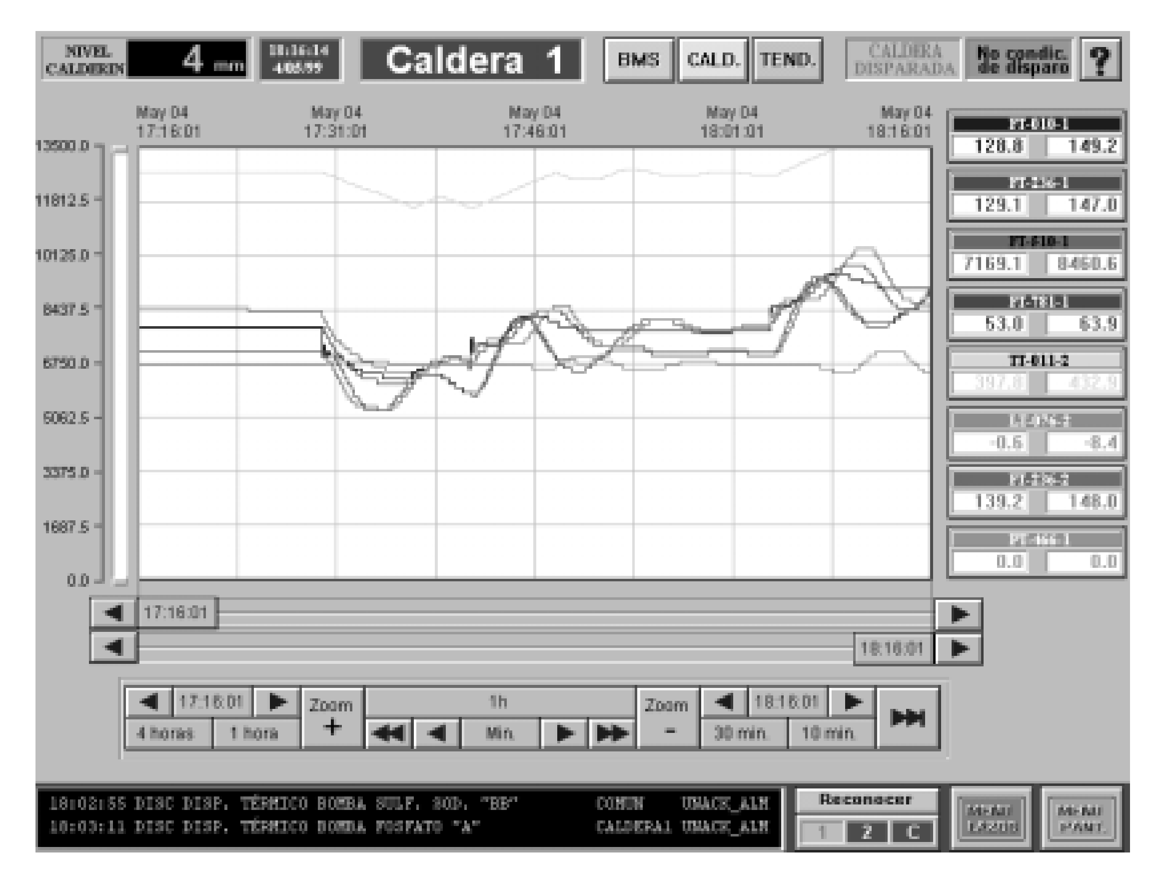


Figura 4-9. Pantalla de históricos



Figura 4-10. Pantalla principal

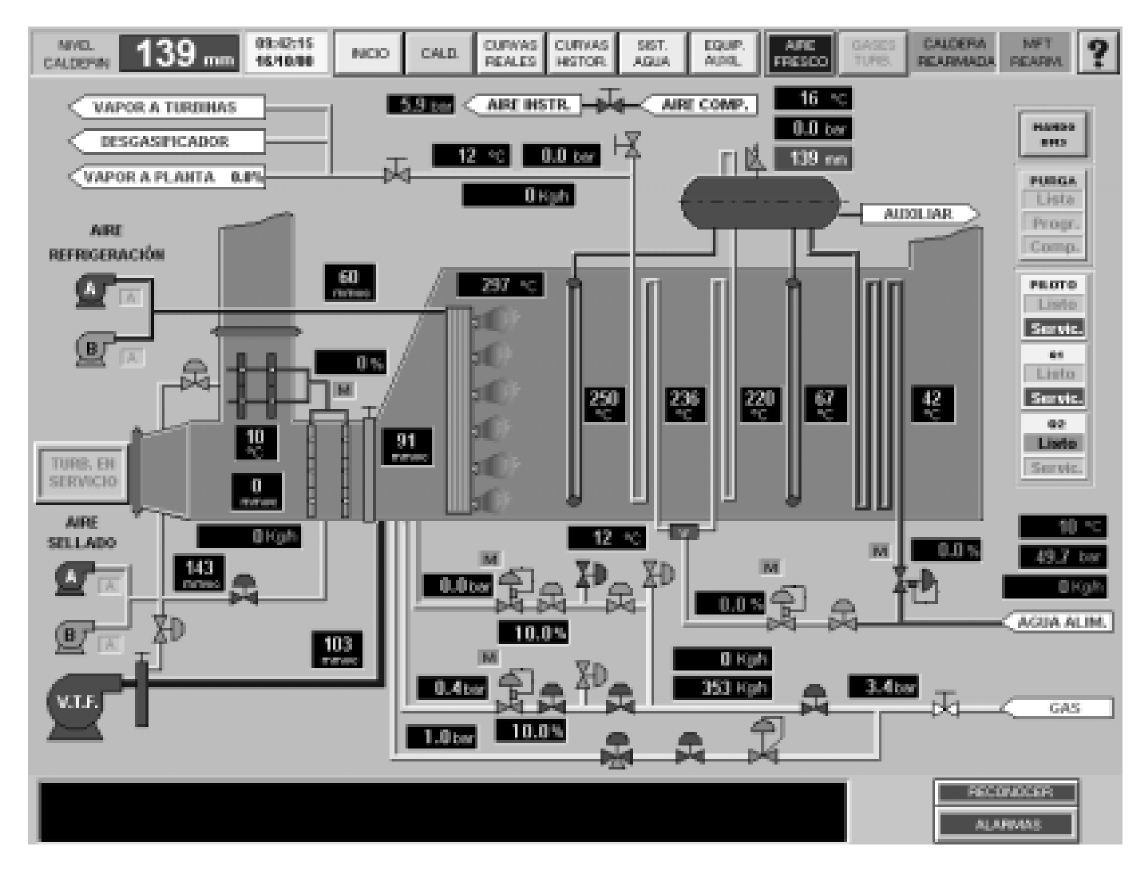


Figura 4-11. Pantalla principal

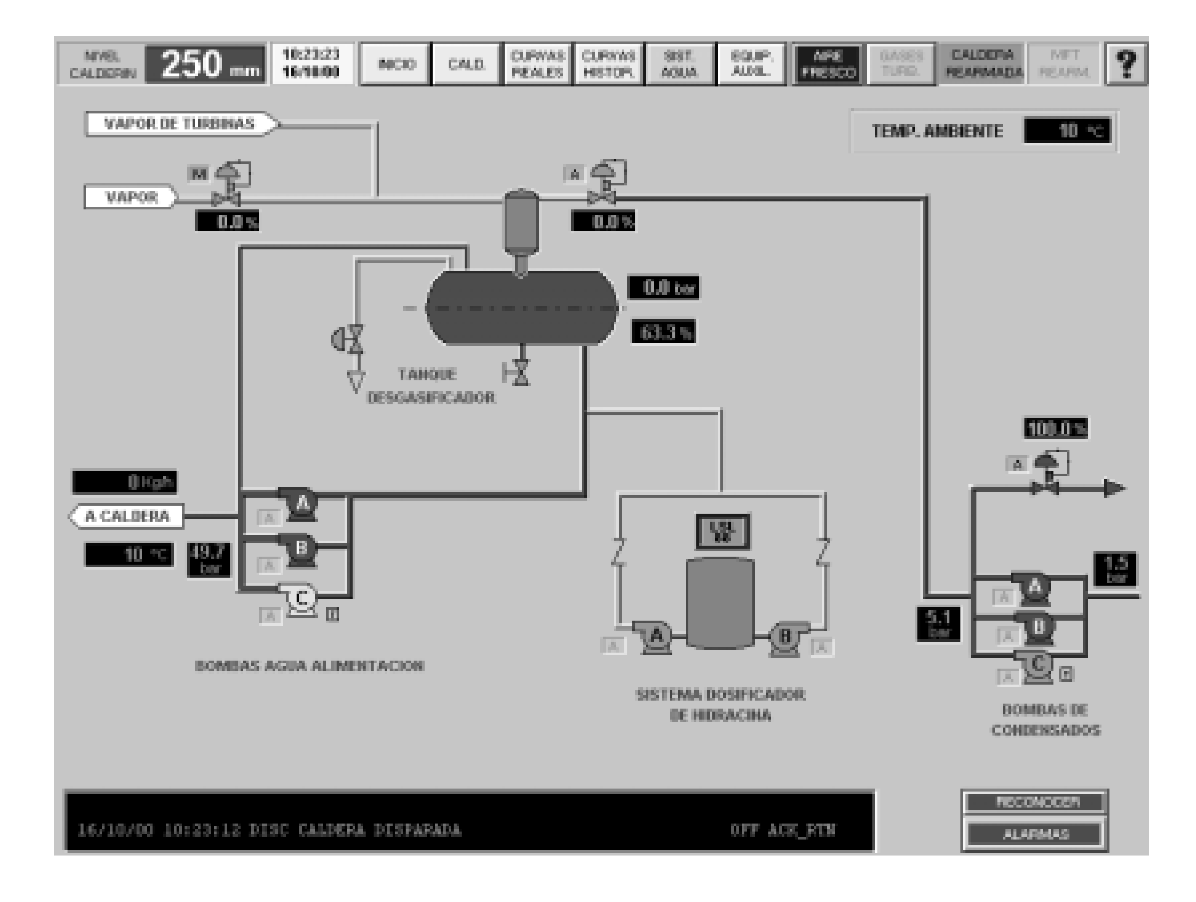


Figura 4-12. Circuito agua alimentación

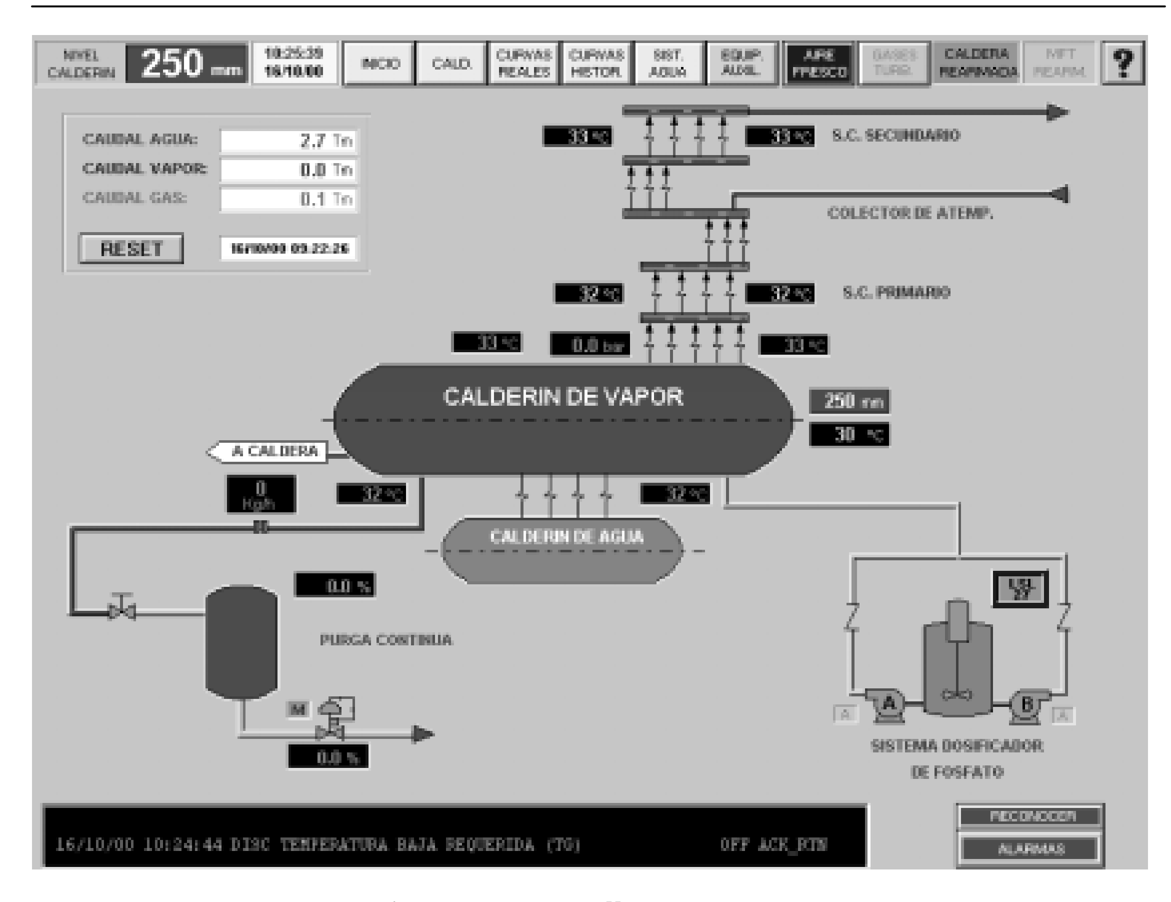


Figura 4-13. Detalle circuito agua-vapor

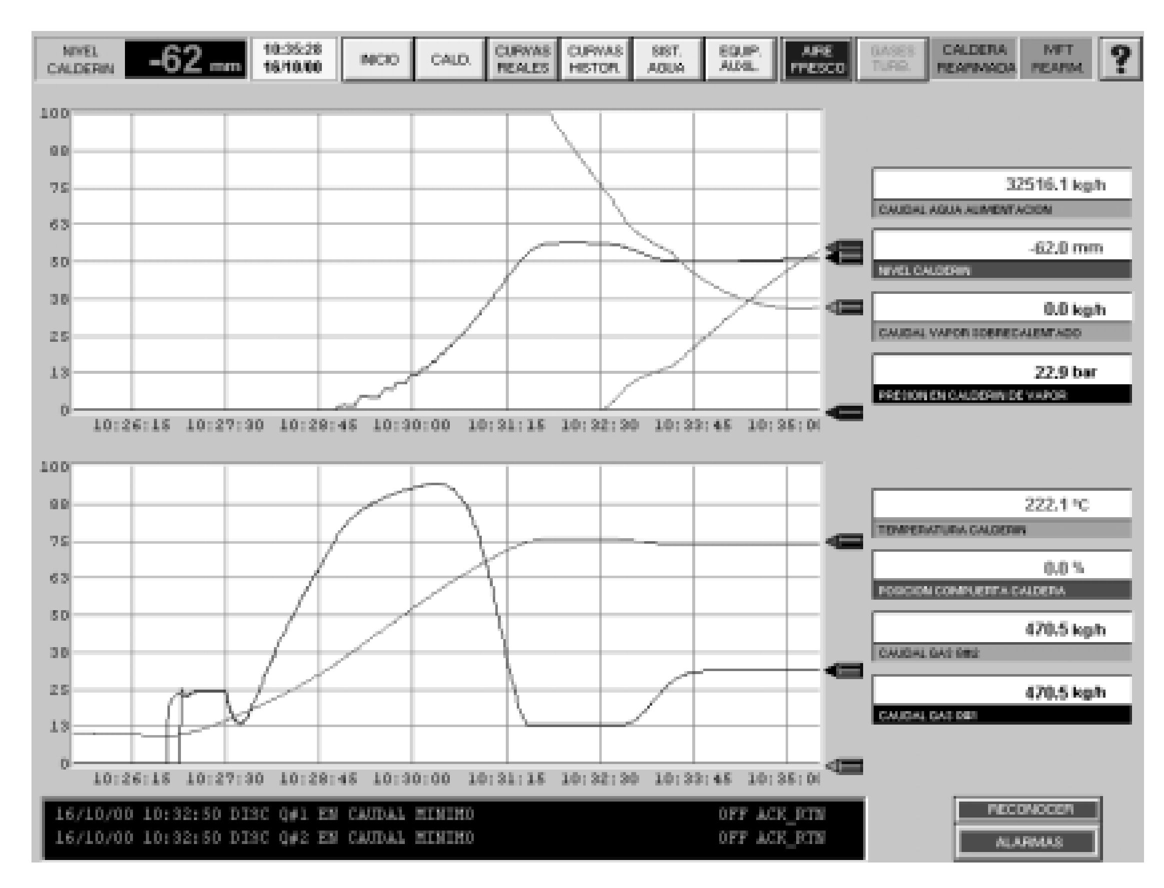


Figura 4-14. Pantalla de tendencias



Figura 4-15. Pantalla de históricos